



Statické a crashové vlastnosti vybraných aramidových a hybridních kompozitů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Marek Šulc**
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek Šulc**
Osobní číslo: **S16000288**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Statické a crashové vlastnosti vybraných aramidových a hybridních kompozitů**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše kompozitních materiálů z hlediska vlákných plniv.
2. Problematika hodnocení kompozitních materiálů.
3. Příprava zkušebních vzorků dle typu plniva.
4. Provedení experimentálních měření a zkoušek.
5. Diskuze výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky, obrázky**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. www.etul.publi.cz, 2015. ISBN iOS: 978-80-88058-72-4, ISBN Android: 978-80-88058-73-1.
- [2] SOVA, M. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashofer s.r.o., 2001. ISBN 80-86229-15-7.
- [3] MEISSNER, B., ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. SNTL/ALFA, Praha 1987.
- [4] BRYDSON, J. A. *Plastics Materials*. Butterworth Scientific, London, 1989.
- [5] MLEZIVA, J. *Polymery, struktura, vlastnosti a použití*. Sobotáles, Praha 1993.
- [6] DOMININGHAUS, H. *Plastics for Engineers (Materials, Properties, Applications)*. Hanser Publisher, Munich, 1993.

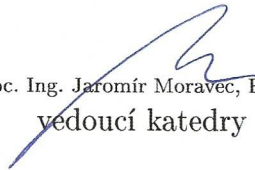
Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jarmír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 21.5.2018

Podpis:



Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlovi Sehnoutkovi z firmy Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. za spolupráci při výrobě kompozitních dílů a praktické poznatky. Dále bych poděkoval Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D za asistence při měření a přípravu zkušebních zařízení. Poděkování patří i prof. Dr. Ing. Petrovi Lenfeldovi za odborné vedení a rady při zpracování této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval i své rodině za podporu během celého studia.

Bc. Marek Šulc

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Anotace:

Teoretická část definuje základní pojmy z oblasti kompozitních materiálů, jejich rozdělení, popis polymerních matric, vláknových výztuží a technologie výroby kompozitů. Cílem experimentální části byla výroba kompozitních dílů (desek) a příprava zkušebních vzorků pro měření mechanických vlastností vybraných materiálů. Měřeny byly tahové, ohybové a rázové vlastnosti, kde výsledkem bylo porovnání mechanických vlastností v závislosti na materiálu, orientaci a druhu textilie.

Klíčová slova:

polymerní kompozity, mechanické vlastnosti, skelná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová vlákna, polyuretanová matrice, technologie HP-RTM

Annotation:

The theoretical part describes the basic terms from the area of composite materials, their distribution, description of polymer matrices, fiber reinforcements and technology of composite production. The aim of the experimental part was the production of composite parts (plates) and the preparation of test samples for measuring the mechanical properties of selected materials. Tensile, bending and impact properties were measured, resulting in a comparison of mechanical properties depending on material, orientation and type of fabric.

Key words:

polymer composites, mechanical properties, glass fiber, carbon fiber, aramid fiber, polyurethane matrix, HP-RTM technology

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	- 8 -
1 ÚVOD.....	- 10 -
2 TEORETICKÁ ČÁST	- 11 -
2.1 Historie kompozitních materiálů.....	- 11 -
2.2 Definice kompozitních materiálů.....	- 12 -
2.3 Vlastnosti kompozitních materiálů	- 13 -
2.4 Rozdělení kompozitních materiálů.....	- 14 -
2.5 Polymerní matrice	- 16 -
2.6 Mezifázové rozhraní.....	- 17 -
2.7 Vláknové výztuže.....	- 18 -
2.7.1 Skleněná vlákna	- 19 -
2.7.2 Uhlíková vlákna	- 20 -
2.7.3 Aramidová vlákna	- 21 -
2.8 Technologie výroby vláknových kompozitů.....	- 22 -
2.8.1 Ruční laminace.....	- 22 -
2.8.2 Nanášení sprejem	- 22 -
2.8.3 Plošné lisovací materiály (SMC).....	- 23 -
2.8.4 Lisovací směsi (BMC)	- 23 -
2.8.5 Technologie RTM	- 24 -
2.8.6 Autoklávová technologie	- 28 -
2.8.7 Pultruze	- 28 -
2.8.8 Navíjení.....	- 29 -
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 30 -
3.1 Složení kompozitního systému	- 30 -
3.2 Příprava textilní výztuže	- 34 -
3.3 Výroba kompozitních desek technologií HP-RTM.....	- 35 -
3.4 Příprava zkušebních vzorků	- 37 -
3.5 Stanovení tahových vlastností.....	- 38 -
3.6 Stanovení ohybových vlastností.....	- 43 -
3.7 Stanovení rázových vlastností (metoda Charpy).....	- 47 -
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ	- 50 -
4.1 Tahové vlastnosti	- 50 -
4.1.1 Mez pevnosti v tahu	- 50 -
4.1.2 Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu.....	- 52 -
4.1.3 Modul pružnosti v tahu	- 53 -

4.2	Ohybové vlastnosti.....	- 54 -
4.2.1	Mez pevnosti v ohybu	- 54 -
4.2.2	Modul pružnosti v ohybu	- 55 -
4.3	Rázové vlastnosti	- 56 -
5	ZÁVĚR.....	- 58 -
	Seznam použité literatury	- 60 -
	Seznam příloh	- 65 -

Seznam symbolů a zkratk

Označení	Rozměr	Význam
b	[mm]	šířka zkušební vzorku
h	[mm]	tloušťka zkušební vzorku
l	[mm]	délka zkušební vzorku
L	[mm]	rozpětí podpěr
s	[mm]	průhyb
L_0	[mm]	počáteční měřená délka pomocí průtahoměru
ΔL_0	[mm]	zvětšení počáteční měřené délky
v	[mm/min]	rychlost zatěžování
Z	[–]	rychlost deformace
F	[N]	zatěžující síla
E_t	[MPa]	modul pružnosti v tahu
E_f	[MPa]	modul pružnosti v ohybu
σ	[MPa]	napětí v tahu
σ_1	[MPa]	napětí při poměrném prodloužení 0,10 %
σ_2	[MPa]	napětí při poměrném prodloužení 0,30 %
σ_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
σ_f	[MPa]	napětí v ohybu
σ_{fm}	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
σ_{f1}	[MPa]	napětí při deformaci ohybem 0,05 %
σ_{f2}	[MPa]	napětí při deformaci ohybem 0,25 %
σ_{fc}	[MPa]	napětí v ohybu při deformaci ohybem 5 %
ε	[%]	poměrné prodloužení
ε_m	[%]	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu
ε_f	[%]	deformace ohybem
ε_1	[%]	poměrné prodloužení 0,1 %
ε_2	[%]	poměrné prodloužení 0,3 %
ε_{f1}	[%]	deformace ohybem 0,05 %
ε_{f2}	[%]	deformace ohybem 0,25 %
A	[%]	tažnost
E_c	[J]	energie potřebná k přeražení zk. vzorku
a_{cU}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost
ρ	[kg/m ³]	hustota
M_{PL}	[kg/m ²]	plošná hmotnost
\bar{x}	[–]	průměrná hodnota
s	[–]	směrodatná odchylka
T	[tex]	délková hustota
J	[dtex]	délková hustota

E_p	$[m^2/s^2]$	měrný modul pružnosti
σ_p	$[m^2/s^2]$	měrná pevnost

Označení	Význam
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
AR	aramid
B	bor
B ₂ O ₃	oxid boritý
C	uhlík
CaO	oxid vápenatý
-NH ₂	aminoskupina
CF	Carbon Fiber (uhlíková vlákna)
EP	epoxidová pryskyřice
GF	Glass Fiber (skleněná vlákna)
K ₂ O	oxid draselný
MF	melamin-formaldehydová pryskyřice
MgO	oxid hořečnatý
PA	polyamid
PAN	polyakrylonitril
PC	polykarbonát
PE	polyethylen
PES	polyesterová vlákna
PF	fenol-formaldehydová pryskyřice
PMI	polymetakrylimid
PP	polypropylen
PUR	polyuretan
SiC	karbid křemíku
SiO ₂	oxid křemičitý
TiB ₂	diborid titanu
UF	močovinoformaldehydová pryskyřice
UP	polyesterová pryskyřice
CMC	Ceramic Matrix Composites (kompozit s keramickou maticí)
MMC	Metal Matrix Composites (kompozit s kovovou maticí)
PMC	Plastic Matrix Composites (kompozit s plastovou maticí)
MH	uhlíková vlákna s vysokou pevností
HT	uhlíková vlákna s vysokou tuhostí
BMC	Bulk Molding Compound (lisovací směs)
FASTRAC	Fast Remotely Actuated Resin Channeling
RTM	Resin Transfer Molding
HP-RTM	High Pressure Resin Transfer Molding
L-RTM	Light Resin Transfer Molding
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Molding Process
SMC	Sheet Moulding Compound (plošné lisovací materiály)
SQRTM	Same Qualified Resin Transfer Molding
VAP	Vacuum Assisted Process
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VIP	Vacuum Infusion Process

1 ÚVOD

Motivace pro využívání kompozitních materiálů ve strojírenství je zejména možnost navrhovat díly a konstrukce velmi lehké a přitom s vysokými hodnotami mechanických vlastností. Kompozity umožňují velmi efektivní využití hmoty a energie vložené do výrobku nebo konstrukce, což prokazatelně vypovídá o perspektivě těchto materiálů pro budoucí strojírenství. Důležitá materiálová kritéria při volbě materiálu pro lehké výrobky a konstrukce, ale s požadavkem na jejich velkou tuhost a pevnost, jsou měrný modul pružnosti a měrná pevnost (jsou to modul pružnosti a pevnost dělené hustotou). Tyto hodnoty v sobě zahrnují jak mechanické vlastnosti, tak hmotnost materiálu. [66]

Trendem ve vývoji jsou hybridní kompozitní systémy. Využívá se směsných tkanin složených např. z uhlíkových a aramidových vláken nebo střídajících se vrstev textilií odlišných vlastností při laminování. [66]

V dnešní době existuje celá řada technologií výroby kompozitních materiálů. Faktory ovlivňující vhodnou volbu jsou: sériovost, velikost a členitost výrobku, procentuální množství výztuže, kvalita povrchu, požadované mechanické vlastnosti a ekonomická stránka. Určitý kompromis je vždy nutný, aby bylo do jisté míry možno vyhovět všem požadavkům.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. V teoretické části je zpracována rešerše, zaměřená na dlouhoválkové kompozity s polymerní maticí. Zejména reaktoplastové matrice, skelná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová vlákna a technologii RTM s jejími variantami. Experimentální část se zabývá výrobou kompozitních dílů technologií HP-RTM ve spolupráci s firmou Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. Kompozitní díly jsou desky složené ze 4, respektive 3 vrstev vláknové výztuže a polyuretanové matrice. Výztuží kompozitního systému byla kombinace skelných vláken, uhlíkových vláken a aramidových vláken v různých strukturách, tj. kombinací materiálů, druhu textilií a její orientaci. Z hotových desek byla pomocí vodního paprsku vyřezána zkušební tělíska s rozměry dle příslušných ASTM norem pro zkoušku tahem, ohybem a dle ISO normy pro rázovou zkoušku (metoda Charpy). Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení mechanických vlastností vybraných kompozitních struktur v závislosti na materiálu vláken, druhu textilie a její orientaci. Testování různých kombinací materiálů a orientací mělo za úkol určit, jaká varianta bude nejvhodnější pro další vývoj. Ohled je přitom nutné brát nejen na mechanické vlastnosti, ale i hmotnost kompozitu, která je ovlivněna plošnou hmotností textilní výztuže.

2 TEORETICKÁ ČÁST

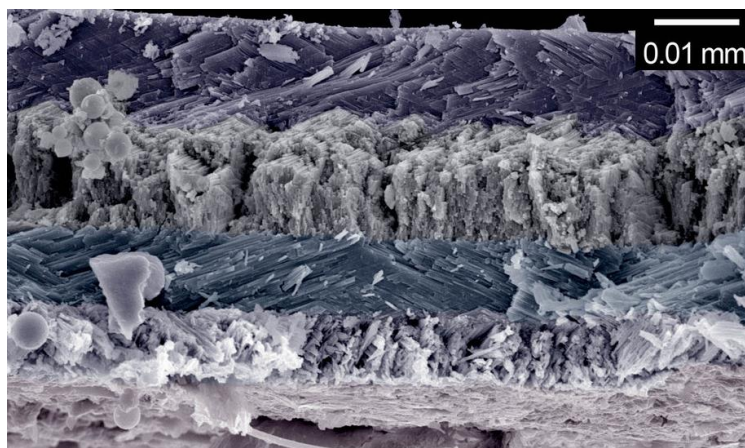
Úvodem teoretické části diplomové práce je stručné seznámení s historií kompozitních materiálů a jejich definicí. Dále je zaměřena zejména na vláknové kompozity, jejich rozdělení a vlastnosti. Zabývá se popisem vláknových výztuží, především skelnými vlákny, uhlíkovými vlákny a aramidovými vlákny. Dále popisuje polymerní matrice obzvlášť reaktoplastové. Závěr části je věnován základním technologiím výroby vláknových kompozitů, s důrazem na technologii RTM.

2.1 Historie kompozitních materiálů

Kompozitní konstrukční materiály vznikly tak, že se jejich tvůrci inspirovali kompozitním uspořádáním struktur v přírodě. Toto uspořádání se objevuje běžně u organických materiálů a struktur, které jsou vystaveny výraznému mechanickému zatěžování. Tyto materiály můžeme nazvat jako přirozené kompozity, např. dřevo, tkáň apod. (viz obr. 1). [1]

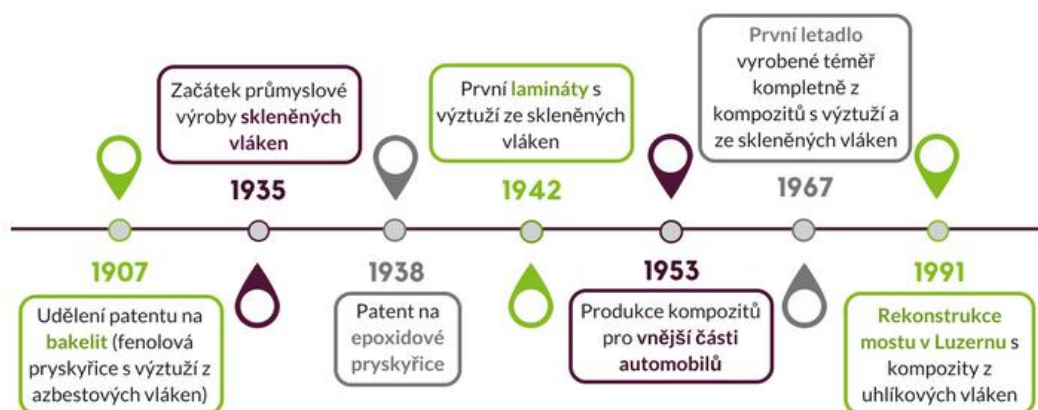
Náznaky prvních kompozitních materiálů nacházíme již 800 let př. n. l., kdy Izraelité využívali ke konstrukcím staveb pevné cihly z hlíny a slámy. Jako další velmi známý příklad kompozitního materiálu, který silně ovlivnil průběh křížáckých válek, je damascenská ocel. Jde o kompozit složený ze střídajících se plátků středně uhlíkové (pod 0,5 % C) a vysokouhlíkové (okolo 2 % C) oceli, díky tomu měl kompozit optimální kombinaci tvrdosti a houževnatosti. [1, 2]

Jiným příkladem historického kompozitu je materiál mongolských luků. Luk je mnohvrstvý kompozit, ve kterém jsou střední vrstvy, dávající luku tvar, dřevěné. Vnitřní vrstvy, namáhané tahem, jsou ze šlach a vnější vrstvy namáhané tlakem, jsou z rohoviny. Současně tak bylo možno docílit specifického tvaru luku i jeho nerovnoměrné ohybové deformace, což se podstatně podílelo na jeho výborných vlastnostech. [2]



Obr. 1: Přirozený kompozit (lom schránky hlemýžďe) [3]

Vědomé využití kompozitních materiálů je patrné až v tomto století. Důsledkem 2. světové války vznikla vize zvýšení výkonových parametrů letadel a raket pomocí kompozitních materiálů, která byla realizována v letech 1940–1950. V letech 1950–1980 byly kompozity výhradně využívány ve vojenské technice, kosmonautice a letectví. Embargo na tuto technologii bylo postupně uvolňováno v letech 1970–1980 pro ostatní odvětví průmyslu, jako výroba sportovních potřeb, závodních automobilů a v civilním letectví. Na časové ose (obr. 2) jsou z historického hlediska nejdůležitější data ve vývoji kompozitních materiálů. [1]



Obr. 2: Časová osa historicky nejdůležitějších dat ve vývoji kompozitů [4]

2.2 Definice kompozitních materiálů

Jelikož neexistuje všeobecně uznávaná definice kompozitního materiálu, používají se dvě velmi podobné, poměrně obecné definice. [2]

Definice používaná v USA, vytvořená ve spolupráci NASA a amerických vojenských vývojových center, používaná v Composite Metals Handbooku [2]:

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužující elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouští a neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.

Druhá je definice G. F. Milтона, zavedená v knížce Theory of Composites, používané jako učebnice v Cambridgi [2]:

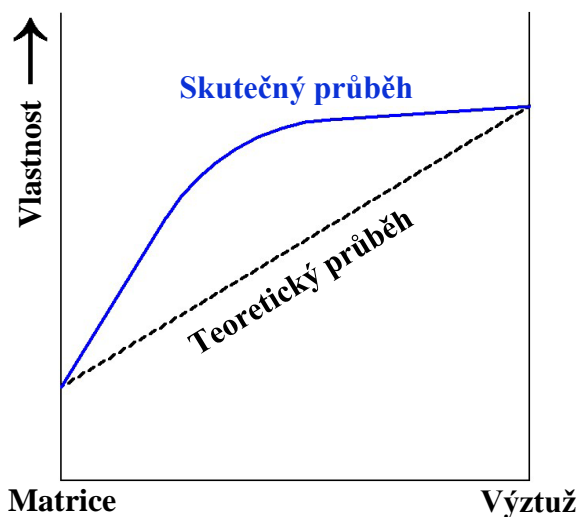
Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou, ale v makroskopickém měřítku, přirozeně (statisticky) homogenní.

2.3 Vlastnosti kompozitních materiálů

Kompozit je vnitřně nehomogenní, ale z makroskopického hlediska homogenní. To vede k zavádění vlastností kompozitních materiálů, které jsou často jen fiktivní. [2]

Synergický efekt

Kompozit je heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastnosti nedosahuje žádná složka kompozitu samostatně, ale ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek. Takový účinek se nazývá synergický, graficky znázorněno na obr. 3. Tento účinek lze symbolicky vyjádřit matematickým vztahem: $1 + 1 = 3$. Kompozitní materiály se vyrábějí tak, aby synergický efekt byl co největší. [5]



Obr. 3: Znázornění synergického efektu v kompozitu [2]

Izotropie a anizotropie

Běžné technické materiály jsou zcela izotropní, nebo projevují jen velmi malou anizotropii. Kdežto pro vláknové kompozity je typické, že mají silnou anizotropii vlastností. U kompozitů s plastovou maticí a uspořádanými vlákny se jeho vlastnosti ve směru vláken a kolmo na ně mohou značně lišit. Proto je nutné s anizotropií kompozitů vždy počítat. [2]

Základní typy materiálu z hlediska symetrie jeho vlastností jsou [2]:

- **izotropní materiál** – má ve všech směrech stejné vlastnosti;
- **zcela anizotropní materiál** – má v každém směru jiné vlastnosti;
- **pseudoizotropní (kvaziizotropní) materiál** – má stejné vlastnosti ve směru tří kolmých základních os a jsou symetrické podle tří rovin tvořených těmito osami;

- **ortotropní materiál** – má vlastnosti symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin. V hlavních směrech má vlastnosti vzájemně různé, ale bez typických efektů anizotropie.
- **Příčně izotropní materiál** – má vlastnosti izotropní v různé rovině. Vlastnosti jsou symetrické podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých. Tato vlastnost je typická pro kompozitní materiály.

Současné požadavky na kompozitní materiály

Cílevědomé vytváření nových kompozitních materiálů má za svůj účel dosažení určitých požadavků, které by byly u běžných materiálů jen těžko splnitelné. Mezi tyto požadavky patří zejména [2]:

- zvýšení tuhosti (zvláště specifické tuhosti – poměru Youngova modulu a hustoty);
- zvýšení pevnosti (zvláště specifické pevnosti – poměru meze pevnosti a hustoty);
- zvýšení rozměrové stability;
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti);
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu);
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály);
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny;
- snížení nasákavosti;
- zmenšení teplotní roztažnosti;
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti;
- udržení hustoty a nebo pevnosti při vysoké teplotě;
- snížení negativního dopadu na životní prostředí;
- redukce hmotnosti (snížení hustoty);
- snížení ceny.

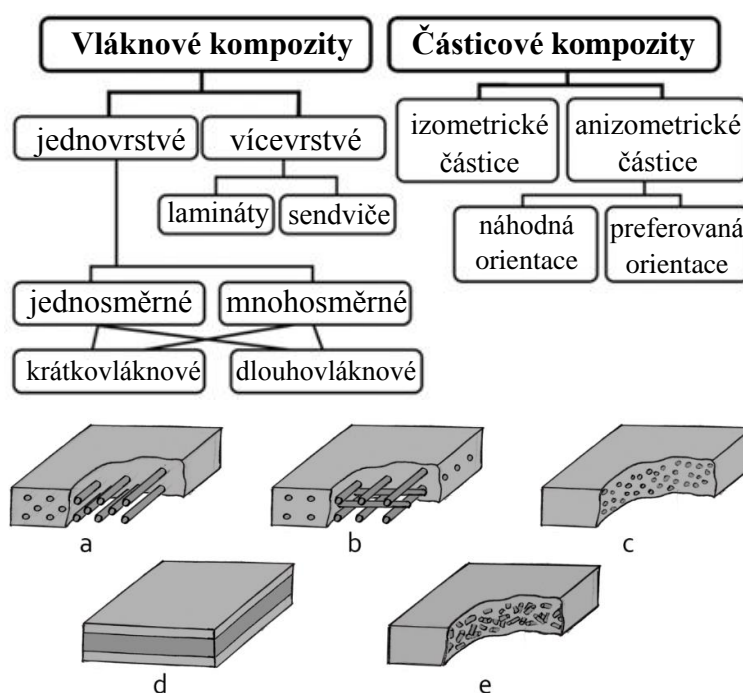
2.4 Rozdělení kompozitních materiálů

Vzhledem k rozsáhlému sortimentu kompozitů se v praxi užívají tři nejběžnější způsoby dělení, které jsou následující [2]:

- a) **Podle vyztužující fáze**
- kompozity *prvního typu* → výztuž z pevné fáze;
 - kompozity *druhého typu* → kapalná výztuž;
 - kompozity *třetího typu* → plynná výztuž.

- b) Podle typu matrice**
- kompozity s *plastovou matricí* (PMC);
 - kompozity s *kovovou matricí* (MMC);
 - kompozity s *keramickou matricí* (CMC).
- c) Podle tvaru výztuže**
- *částicové* (izometrické, neizometrické);
 - *vláknové* (spojitá vlákna, krátká vlákna, dlouhá vlákna);
 - *deskové* (matrice i výztuž složena ze vzájemně se střídajících desek).

Schématické rozdělení kompozitů je uvedeno na obr. 4. Na obr. 5 jsou příklady kompozitních materiálů z praxe. V následujících kapitolách 2.5 a 2.6 je potom rozdělení zaměřeno na kompozity s polymerní matricí a vláknovou výztuží.



Obr. 4: Rozdělení kompozitů a příklady struktur dle tvaru výztuže [6]

- a) jednosměrný dlouhovláknový kompozit, b) mnohoseměrný vláknový kompozit;
c) částicový kompozit; d) vrstvený (sendvičový) kompozit;
e) krátkovláknový kompozit s náhodnou orientací vláken



Obr. 5: Příklady kompozitních materiálů: a) vrstvený kompozit s voštinovým jádrem, b) kompozit s pěnovým jádrem z PMI, c) kompozit s pěnovým jádrem z hliníku [7, 8, 9]

2.5 Polymerní matrice

Matrice je spojitá fáze, tvořící většinou část kompozitu. Její základní funkce spočívá v přenosu vnějšího zatížení na vyztužující fázi. Napětí je v kompozitním materiálu přenášeno díky adhezi, tj. třením na hranici výztuž-matrice. Další požadavek na matici je dobrá soudržnost na mezifázovém rozhraní s materiálem vyztužující fáze. [10] Polymerní matrice kompozitů mohou být tvořeny termoplastem (PA, PE, PP, PC aj.), zesíťovaným elastomerem a převážně reaktoplastem. Každý z těchto polymerů má své výhody a je vhodný pro jiné konečné aplikace.

Reaktoplastové matrice

- **Fenoplasty**

Fenolické pryskyřice vznikají polykondenzací fenolu a aldehydy, nejčastěji formaldehydem za vzniku fenolformaldehydové pryskyřice (PF). Zpracovávají se na lisovací hmoty, teplotu tání mají v rozmezí $(70 \div 105) ^\circ\text{C}$ a do zesíťovaného stavu se převádí teplem nebo vytvrzujícími prostředky. Jejich polarita je značná, proto jsou elektrické vlastnosti nízké a dielektrické ztráty vysoké. Dobře odolávají nepolárním rozpouštědlům, kyselinám i povětrnosti. [11]

- **Aminoplasty**

Aminopryskyřice vznikají kondenzací látek obsahujících v molekule aminoskupiny $-\text{NH}_2$ (např. močoviny a melaminů) s aldehydy, nejčastěji formaldehydem. Při dalším účinku tepla se vytvrzují na plasty. Pryskyřice jsou obvykle dodávány ve formě roztoku, s ohledem na jejich stabilitu se zahušťují nebo suší. Mezi hlavní druhy patří: močovinoformaldehydové (UF) a melamin-formaldehydové (MF). [11]

- **Epoxidové pryskyřice (EP)**

Jejich řetězec obsahuje zpravidla více než jednu epoxidovou skupinu, které jsou značně reaktivní s velkým počtem sloučenin a vedou k zesíťovaným makromolekulám. Jejich hlavní výhoda je velká přilnavost k ostatním materiálům, chemická odolnost a minimální smrštění při vytvrzování. [11]

- **Polyesterové pryskyřice (UP)**

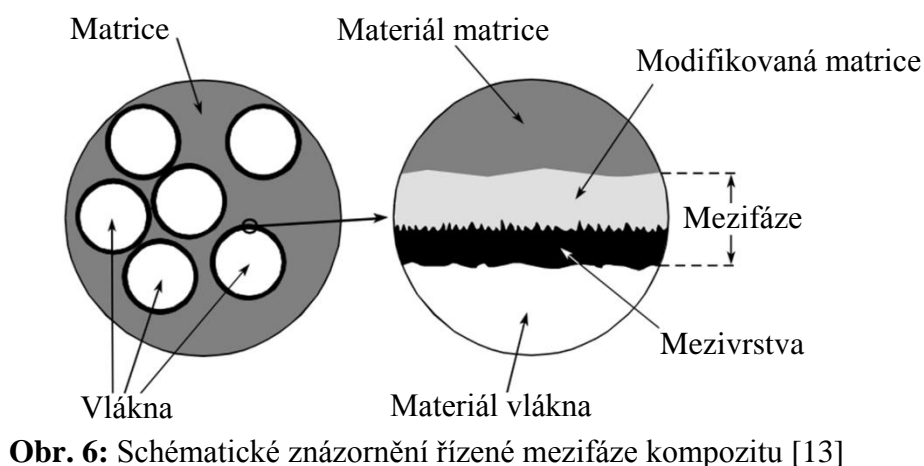
Jsou to nenasycené polyesterové rozpuštěné v reaktivním monomeru (nejčastěji styrenu) schopné kopolymerace pomocí iniciátorů a urychlovače reakcí, kterou dojde k vytvrzení pryskyřice. [11]

- **Polyuretany (PUR)**

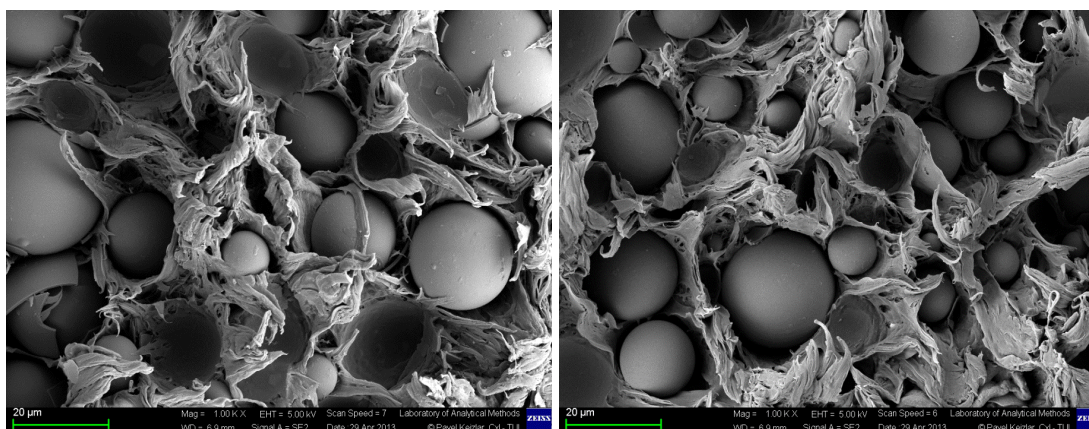
Jedná se o materiál, který může být semikrystalickým termoplastem (linéární PUR), reaktoplastem nebo elastomerem (zesíťovaná struktura). Polymer vzniká polyadiční reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy (polyoly) za vzniku uretanu. [11]

2.6 Mezifázové rozhraní

Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů určuje kombinace rigidní a vysokopevnostní výztuže s polymerní matricí s vysokou houževnatostí. Nejedná se pouze o jednoduchý dvoufázový systém, ale je nutno zohledňovat oblast mezifáze. Jedná se o tenkou hraniční vrstvu určující velikost a charakter přenosu napětí z matrice na výztuž. Schopnost přenosu napětí závisí na velikosti mezifázových sil a současně zahrnuje mechanické vlastnosti matrice, vláken a adhezi. Mezifáze může být řízená a neřízená. Řízená mezifáze (obr. 6) je cílená povrchová úprava výztuže, kdy je na povrch vláken nanášena definovaným a reprodukovatelným způsobem tenká reaktivní mezivrstva, která zlepšuje smáčení a umožňuje tak vznik pevné vazby jak k výztuži, tak k matrici. [12] Na snímcích z elektronového mikroskopu (obr. 7) je rozdíl mezi ovlivněným (řízeným) a neovlivněným (neřízeným) mezifázovým rozhraním.



Obr. 6: Schématické znázornění řízené mezifáze kompozitu [13]



Obr. 7: Mezifázové rozhraní: neřízené (vlevo), řízené (vpravo) [14]

2.7 Vláknové výztuže

Pro výrobu kompozitů se používají nejrůznější druhy vláken. Můžeme je roztrdit do následujících skupin [2]:

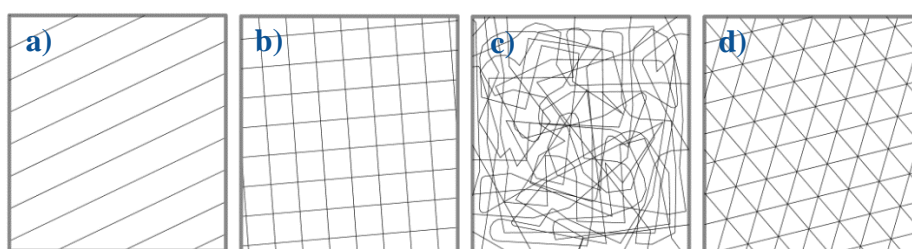
- přírodní vlákna (lněná; bavlněná; jutová; konopná; kokosová, viz obr. 9a);
- skleněná vlákna;
- uhlíková vlákna;
- aramidová vlákna;
- keramická vlákna (obr. 9b);
- kovová vlákna (obr. 9c);
- whiskery.

Vlákna mají zpravidla kruhový průřez a jejich průměr se pohybuje v rozmezí [2]:

- do průměru 100 nm → nanovlákna;
- 0,1 až 1 μm → mikrovlákna (např. whiskery);
- 1 až 10 μm → střední vlákna (uhlíková, skleněná, textilní);
- nad 10 μm → hrubá vlákna (B, TiB₂, SiC apod.).

V matrici mohou být vlákna orientována následujícím způsobem (obr. 8) [15]:

- jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken;
- dvouosá orientace, křížově položené jednosměrné „prepregy“ nebo tkanina;
- rohož, nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken (netkaná textilie);
- víceosá výztuž z kontinuálních vláken (sešité jednosměrné vrstvy nebo tkaniny).



Obr. 8: Orientace vláken v matrici [15]



Obr. 9: Příklady druhů vláken: a) kokosová; b) keramická; c) kovová [16, 17, 18]

2.7.1 Skleněná vlákna

Princip výroby skelných vláken spočívá v roztavení sklářského kmene ve sklářských vanách. Roztavené a homogenizované sklo pak pozvolna vytéká do platinových pícek s tryskovým dnem, skrz které má tendenci prostupovat ven. Kapky roztaveného skla jsou z pícky vytaženy a navedeny na navíječku, která konstantní rychlostí protáhne roztavenou sklovinu na vlákna o požadovaném průměru.

Při tomto procesu se na vlákno současně nanáší lubrikace, která mu udělí vlastnosti důležité pro další zpracování (kompatibilitu s různými povrchovými úpravami, pryskyřicemi atd.). [20] Na obr. 10 je roving ze skelných vláken.



Obr. 10: Skelný roving [19]

Základní vlastnosti skleněných vláken jsou [2]:

- hustota okolo 2500 kg/m^3 ;
- tuhost zhruba jako hliník, $1/3$ tuhosti oceli, $E = 80$ až 100 GPa ;
- malá odolnost skleněných vláken proti únavě;
- pro zvětšení smáčivosti je žádoucí úprava povrchu – lubrikace, ta ale snižuje pevnost vláken;
- tepelná vodivost je o polovinu nižší než u oceli;
- tepelná roztažnost je méně než polovina tepelné roztažnosti oceli.

Nejčastěji používané typy skel na vlákna do kompozitů jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Typy skel používaná na vlákna do kompozitů [2, 10]

Označení skla	Použití	Složení v %	Pevnost v tahu [GPa]	Tažnost [%]
E	Elektrické izolace	55 SiO ₂ , 11 Al ₂ O ₃ , 6 B ₂ O ₅ , 18 CaO, 5 MgO	3,4	3,8
S	Vysokopevnostní kompozity	65 SiO ₂ , 25 Al ₂ O ₃ , 10 MgO	4,8	5,2
A	Tepelné izolace	72 SiO ₂ , 11 Al ₂ O ₃ , 3 MgO, 10 CaO, 14 K ₂ O	3,2	3,6
C (Pyrex)	Chemické aplikace	65 SiO ₂ , 4 Al ₂ O ₃ , 6 B ₂ O ₃ , 3 MgO, 14 CaO, 9 K ₂ O	3,1	3,2

2.7.2 Uhlíková vlákna

Nejčastější metoda výroby uhlíkových vláken je dnes pyrolýzou PAN (polyakrylonitril). Výroba je popsána těmito kroky [2]:

- **Prekursor** – PAN vlákna, jedná se o termoplast a vlákna se táhnou z taveniny.
- **Stabilizace** – oxidace 1–2 hodiny při 200 až 300 °C na vzduchu, případně za působení tahového napětí. Dochází k zesíťování makromolekul kyslíkovými můstky, vlákno zčerná a stane se netavitelné.
- **Karbonizace** – 30–60 vteřin při 1200 až 1500 °C v dusíku, dochází k rozkladu makromolekul (odstraní se vodík a sníží obsah kyslíku a dusíku), 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík.
- **Grafitizace** – 15–20 vteřin při 2000 až 3000 °C v dusíku s argonem, tím se zvýší obsah uhlíku a dojde k překrystalizaci na grafit.

Oproti skelným vláknům mají asi desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu (1800 až 2000 kg/m³), zároveň mají menší tažnost. Pevnost při pokojové teplotě bývá nižší než u skla nebo aramidu, ale s teplotou neklesá až do 1000 °C. Mají minimální teplotní roztažnost, někdy dokonce smrštivost (ve směru osy vláken). Oproti sklu jsou velmi odolná únavě, ale málo odolná ostrým ohybům. Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní, elektricky vodivá a často mají špatnou adhezi k matici, proto je nutná povrchová úprava ke zlepšení přilnavosti. [2] Na obr. 11 je roving z uhlíkových vláken.



Obr. 11: Uhlíkový roving [21]

Grafitová vlákna je možné vyrábět buď s vysokou pevností (HT), nebo s vysokou tuhostí (HM). Tabulka (tab. 2) udává typické vlastnosti těchto druhů vláken. [2]

Tab. 2: Typické vlastnosti uhlíkových vláken [2]

Označení	Použití	Pevnost v tahu [GPa]	Youngův modul [GPa]	Tažnost [%]
HT	Vysoká pevnost	3,1	240	1,2
HM	Vysoká tuhost	2,1	400	0,5

2.7.3 Aramidová vlákna

Po stránce chemické struktury jsou aramidy aromatické polyamidy. Makromolekuly obsahují ve svém řetězci amidové (-CO-NH-) a aromatické skupiny. Největší praktický význam má para-aramid, v kterém jsou benzenová jádra vázána v para-poloze na amidové skupiny. Aramidová vlákna mají vynikající odolnost proti účinkům rozpouštědel, kapalných paliv a slané vody, ale degradují účinkem UV záření za přítomnosti kyslíku. Silně polární vodíkové můstky ve struktuře sice způsobují absorpci vody, ale nemá to za následek výraznější zhoršení mechanických vlastností. Má velkou odolnost proti abrazi a při textilním zpracování se vlákna nepoškozují. [22] Hodnoty pevnosti a tuhosti se nachází mezi uhlíkovými a skelnými vlákny. Výrazně se však odlišují svojí extrémní houževnatostí, díky které jsou vlákna schopna absorbovat velké množství energie, než dojde k jejich prasknutí [24]. Nízké povrchové napětí aramidu a chemická inertnost způsobuje špatnou mezifázovou adhezi k matrici. Vzhledem k tomu se vlákna často povrchově upravují (fluorací nebo oxyfluorací). [10] Aramidová vlákna jsou známa pod obchodními názvy jako: kevlar, twaron, nomex.



Obr. 12: Aramidový roving [23]

Na obr. 12 je roving z aramidových vláken.

Základní vlastnosti kevlaru jsou [2]:

- při hustotě 1440 kg/m^3 vynikající pevnost (pětinásobek oproti oceli);
- deformace při přetržení menší než u skla, ale větší jak u grafitu;
- při dlouhodobém zahřívání nad 175°C vlákna degradují;
- má záporný koeficient teplotní roztažnosti.

Kevlarových vláken existuje více druhů, pro porovnání jsou jejich základní vlastnosti uvedeny v tabulce (tab. 3).

Tab. 3: Typické vlastnosti vybraných kevlarových vláken [10]

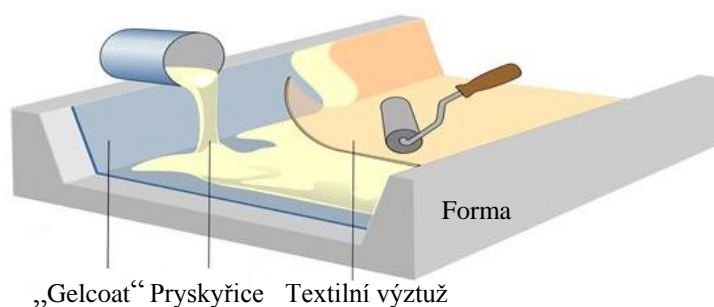
Vlákno	Hustota [kg/m^3]	Pevnost v tahu [GPa]	Youngův modul [GPa]	Tažnost [%]
Kevlar 29	1440	3,6	83	4
Kevlar 49	1440	$3,6 \div 4,1$	131	2,8
Kevlar 149	1470	3,4	186	2

2.8 Technologie výroby vláknových kompozitů

Technologií výroby kompozitních materiálů je dnes již celá řada. Faktory pro volbu vhodného způsobu výroby jsou: sériovost, velikost a členitost výrobku, % množství výztuže, kvalita povrchu, požadované vlastnosti a ekonomická stránka. Určitý kompromis je vždy nutný, aby bylo do jisté míry možno vyhovět všem požadavkům. [10]

2.8.1 Ruční laminace

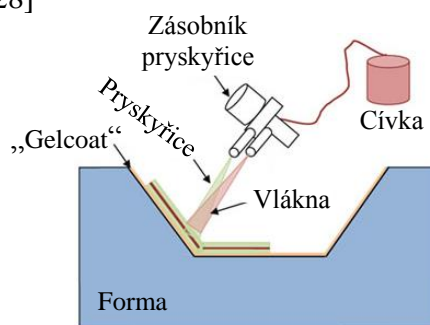
Jedná se o klasickou jednoduchou metodu ručního kladení tkanin nebo rohoží do formy (obr. 13). První (pohledová) vrstva nanesená na formu bývá „gelcoat“, na který se po zaschnutí klade v jednotlivých vrstvách textilní výztuž. Jednotlivé vrstvy se postupně důkladně prosycují pryskyřicí a válečkem se vytlačí nežádoucí vzduchové bubliny, které vznikají mezi jednotlivými vrstvami při pokládce. Následně se díl nechá vytvrdit. Tento způsob je vhodný pro tvarově členité výrobky a pro výrobu prototypů či malosériových zakázek. Předností této technologie je investiční nenáročnost s ohledem na cenu výrobního zařízení. [25, 26]



Obr. 13: Schéma ruční laminace [27]

2.8.2 Nanášení sprejem

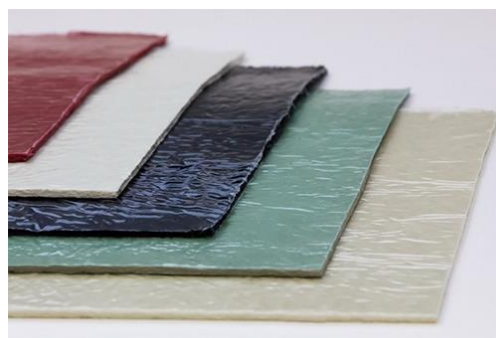
Vlákna odvíjená z cívky jsou ve speciální pistoli sekána na určitou délku, mísená s pryskyřicí a stříkána na formu (viz obr. 14). Nejběžněji se využívají polyesterové pryskyřice se skelnými vlákny. Tato technologie je vhodná pro výrobu malých až velkých dílů, které nejsou náročné na konstrukci, protože nelze přesně řídit objem frakce vláken a nanášenou tloušťku. [28]



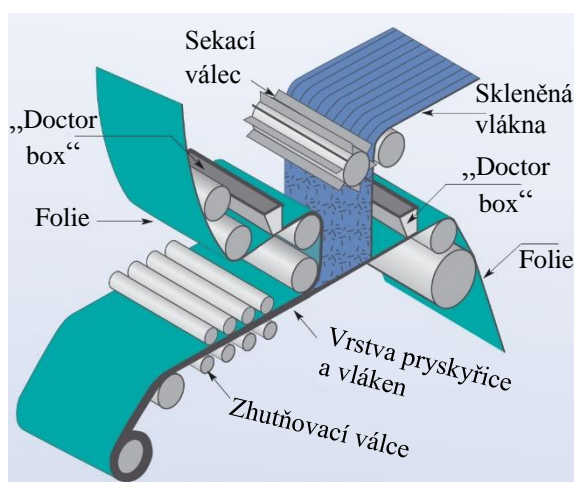
Obr. 14: Schéma nanášení sprejem [29]

2.8.3 Plošné lisovací materiály (SMC)

SMC (Sheet Moulding Compound) je kompozitní materiál složený z reaktoplastické matrice (obvykle polyesterové) a sekaných skelných vláken, který je vyráběn ve formě plátů (obr. 15). Následně je možné z plátů vyřezat díly potřebných velikostí, které se na sebe navrství a za tepla a tlaku se v lisu zformují do požadovaného tvaru a vytvrdí. Materiály vyrobené touto technologií se používají ve stavebnictví, elektroinstalacích a automobilovém průmyslu. [31]



Obr. 15: SMC pláty [30]



Obr. 16: Proces výroby SMC [32]

Proces výroby plátů je znázorněn na obr. 16 a spočívá v roztírání tenké vrstvy pryskyřice zařízením („doctor box“) na plastovou fólii. Ta prochází pod zařízením sekající skelná vlákna, která jsou rovnoměrně nanášena na pryskyřici. Následně je vrstva vláken překryta další vrstvou pryskyřice. Tento plát pak prochází systémem válců, kde za působení tlaku dochází ke zhutnění a prosycení vláken. Hotové pláty se navíjí na cívku nebo skládají do bloků. [31]

2.8.4 Lisovací směsi (BMC)

BMC (Bulk Molding Compound), označováno také jako „premix“, viz obr. 17. Jedná se o kompozitní materiál složený převážně z reaktoplastové pryskyřice (nejčastěji polyesterové) a skelných vláken (délky < 25 mm). BMC se používá především pro produkci výrobků lisováním nebo vstřikováním, kdy se za tepla a tlaku zformují do požadovaného tvaru a vytvrdí. Materiály BMC mají široké uplatnění ve stavebnictví, elektroinstalacích, automobilovém průmyslu, ale také v domácnostech a medicíně. [33]



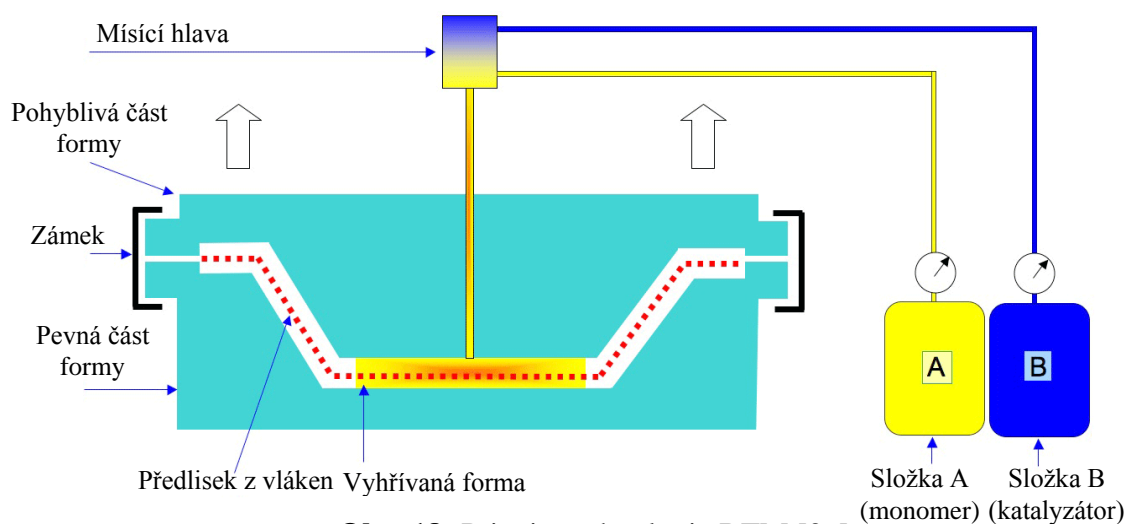
Obr. 17: Lisovací směs [34]

2.8.5 Technologie RTM

RTM (Resin Transfer Molding), je jednou z technologií zabývající se výrobou kompozitních materiálů složených z pryskyřicové matrice a soustavy vláken. [35].

Výrobní postup je znázorněn na obr. 18 a skládá se z následujících operací [35]:

- Dutina otevřené formy se opatří separační látkou, pro zamezení přilnavosti pryskyřice ke stěnám dutiny formy.
- Do dutiny formy se vloží předlisek (suchá vlákna uspořádaná do požadované struktury nebo mohou být opatřena pojivem).
- Forma se uzavře a uzamkne.
- Do dutiny se pod tlakem vstříkne směs pryskyřice s vytvrzovacím činidlem (někdy lze místo vytvrzovacího činidla užít ohřev vstříknuté pryskyřice, nesmí se však teplem poškodit výztuž).
- Vytvrzování pryskyřice.
- Otevření formy.
- Vyjmutí výrobku.
- Vyčištění dutiny formy.
- Kontrola výrobku a případné konečné úpravy výrobku.



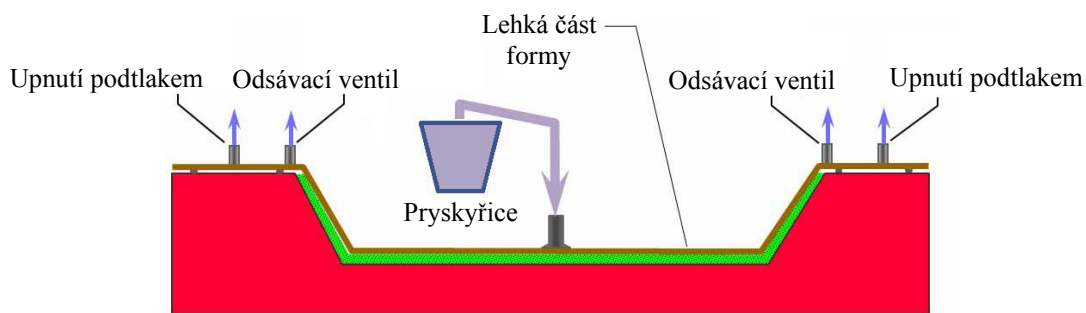
Obr. 18: Princip technologie RTM [36]

Vstřikovací tlak pryskyřice závisí na struktuře předlisku, jeho tloušťce, velikosti a tvaru výrobku, druhu pryskyřice atd., je obecně nízký cca 0,3 MPa. Po vstříknutí se pryskyřice pohybuje skrz výztuž, resp. předlisek umístěný v dutině formy. Vzduch je z dutiny formy vytlačován postupujícím čelem pryskyřice. Pro únik vzduchu je forma opatřena odvětrávacími ventily, které jsou umístěny v nejvyšších bodech dutiny formy

nebo v prostorách dutiny, které jsou plněny jako poslední. Když je dutina formy zcela zaplněna pryskyřicí, jsou ventily a vtoky uzavřeny. Vytvrzování probíhá při okolní teplotě za pomoci tvrdidla nebo pomocí ohřevu. Následně je výrobek vyjmut z formy. [35]

L-RTM (Light RTM)

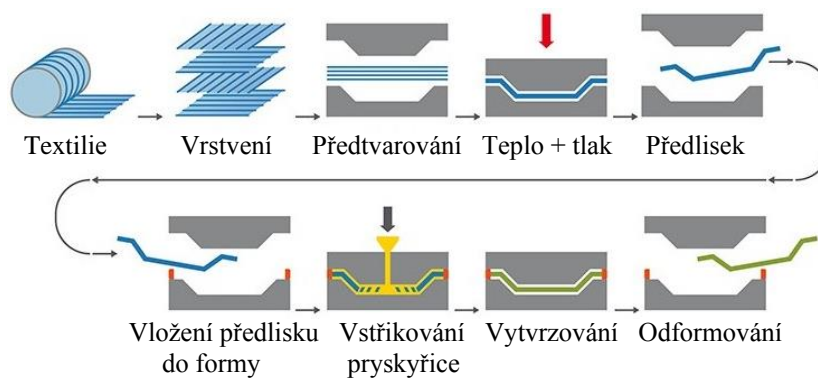
Modifikací RTM je L-RTM, neboli Light (lehký) RTM. Při tomto postupu je horní část formy nahrazena lehkou částí a funkci vstřikovacího tlaku přebírá atmosférický tlak. Pro průběh procesu je nutné vytvoření podtlaku v dutině formy odsávacími ventily na okrajích výrobku. Metoda je schématicky znázorněna na obr. 19. Tlak se pohybuje mezi 0,1 až 0,3 MPa (dovoluje méně tuhé a lehčí formy). Tato metoda je vhodná pro menší série, pro větší série je zapotřebí větší počet forem. [35, 37]



Obr. 19: Princip L-RTM [38]

HP-RTM (High Pressure RTM)

Další variantou RMT je HP-RTM, neboli High Pressure (vysokotlaké) RTM. Vysokým tlakem se rozumí 0,3 až 12 MPa v dutině formy v závislosti na velikosti a geometrii součástí. Oproti klasickému RTM, kde se používají statické a dynamické směšovací hlavy, tak u HP-RTM se využívají speciální směšovací hlavy, kde se komponenty mísí při tlaku až 15 MPa. Tato technologie je určena pro výrobu lehkých, vysoce výkonných konstrukčních prvků. Její výhodou jsou poměrně krátké výrobní cykly a reprodukovatelná kvalita. Uplatnění nachází převážně v automobilovém průmyslu a je vhodná pro vyšší série. [39] Technologie s výrobou předlisku je schématicky znázorněna na obr. 20.



Obr. 20: Princip HP-RTM (s výrobou předlisku) [40]

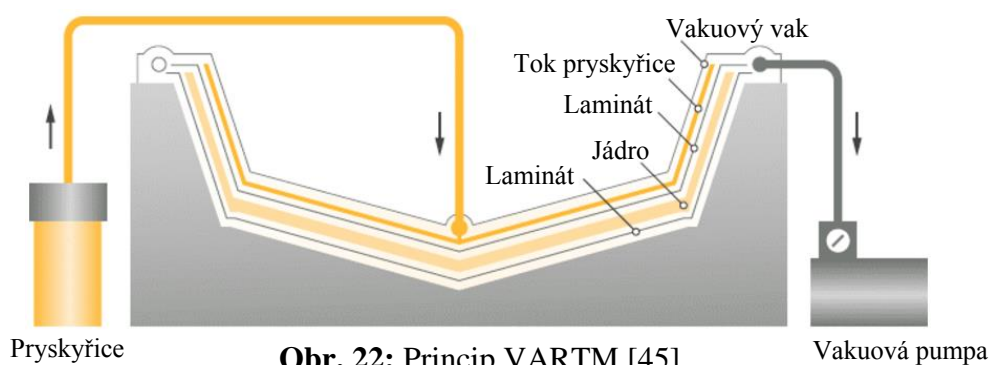
Modulární řešení komponentů umožňuje sestavení automatizované výrobní linky přesně dle požadavků výroby. Příklad provedení lisu od společnosti Langzauner 200T pro HP-RTM, dávkovací jednotky Hennecke QFOAM a směšovací hlavy KraussMaffei je na obr. 21.



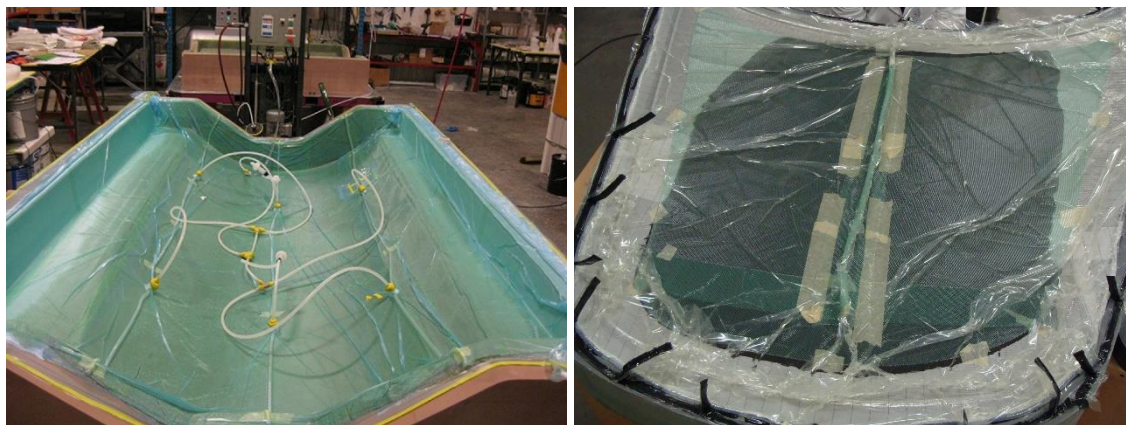
Obr. 21: a) lis Langzauner 200T; b) dávkovací jednotka Hennecke QFOAM; c) směšovací hlava KrausMaffei [41, 42, 43]

VARTM (Vacuum Assisted RTM)

Jedná se o modifikaci klasické technologie RTM, kdy prosycení výztuže pomáhá vakuum. Pryskyřice s malou viskozitou teče do dvoudílné formy, ve které je předtvarovaná výztuž („preform“). Tok pryskyřice je vyvolán jak vstříknutím, tak podtlakem. Více běžné je použití jednodílné formy, kde druhá strana je tvořena fólií, filmem nebo vakem (obr. 22, 23). Název VARTM bývá často používán i pro čistě infuzní technologie, kdy k toku pryskyřice dochází jen díky podtlaku. Jde o technologie jako SCRIMP, VIP, VAP, FASTRAC a další. Výhodou této technologie je díky nižším tlakům v rozsahu 0,04 až 0,1 MPa možnost konstruovat díly méně robustní, což umožňuje výrobu i větších dílců. [37, 44]



Obr. 22: Princip VARTM [45]



Obr. 23: Technologie VARTM (vlevo), VIP (vpravo) [46, 47]

SQRTM (Same Qualified RTM)

Rozdíl oproti klasickému RTM je, že je suché vlákno nahrazeno předimpregnovanými vlákny („prepreg“). Předem připravené vrstvy jsou uspořádány uvnitř formy a následně je forma uzavřena. Do nástroje je pomalu vstřikována pryskyřice (stejná jako je použita v prepregu), při tlaku přibližně 0,7 MPa. Tlak pryskyřice není určen k tomu, aby impregnoval vlákna, ale pouze k udržení stabilního hydrostatického tlaku uvnitř formy. [48]

2.8.6 Autoklávová technologie

Jedná se o moderní výrobní proces, kterým se zpracovávají převážně uhlíková vlákna. Přesně nařezaný prepreg se pokládá a vrství do formy, která je následně s dalšími pomocnými technickými fóliemi zabalena do tzv. vakuového pytle. Tento vakuově stabilní celek se vloží do autoklávu (viz obr. 24), kde se podle přesně regulovaného programu spustí vytvrzování působením tepla a vysokého tlaku (až 1,2 MPa). Výsledný produkt je vysoce pevný a lehký. Doposud se jedná o nejlepší zpracování a výrobu kompozitů na trhu. Využití nachází zejména v automobilovém průmyslu, letectví, motorsportu a zdravotnictví. [49]



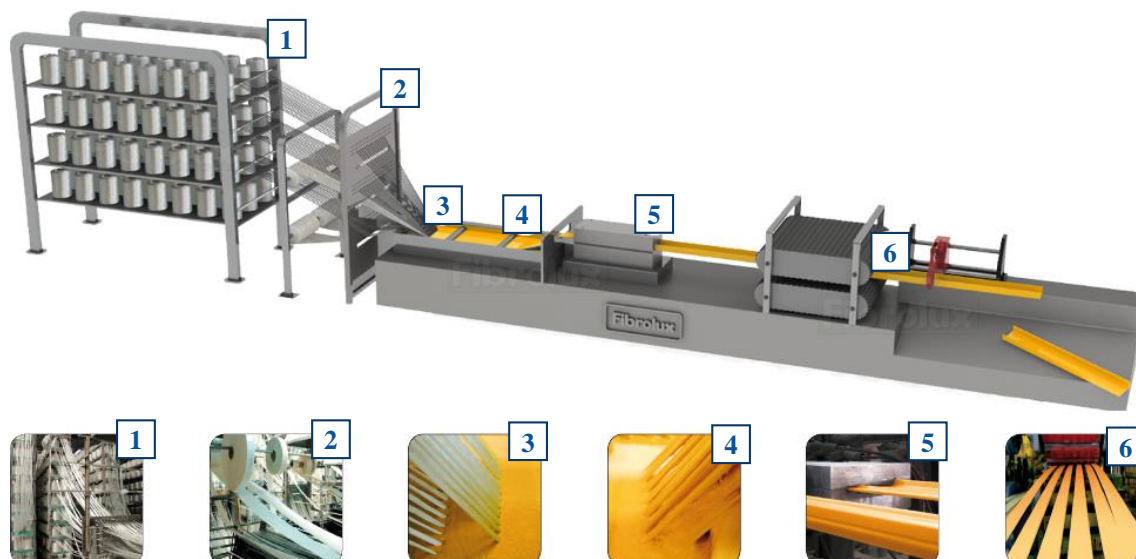
Obr. 24: Vakuově zabalený celek (vlevo), autokláv (vpravo) [49]

2.8.7 Pultruze

Pultruze je proces kontinuální výroby kompozitních profilů různých tvarů a délky tažením. Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Vyztužující materiál, převážně skelné vlákno, je ve formě rovingu a plošných rohoží. [50]

Postup pultruze (viz obr. 25) je následující [50]:

- Vlákná navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu a správné umístění rohoží.
- V dalším zařízení se vlákna, rohože smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátorů, popř. dalších přísad pro zlepšení vlastností. Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil.
- V předtvarovací formě se vytlačuje přebytečné pojivo, profil se tvaruje a vstupuje do vytvrzovací formy, kde se za působení tepla vytvrzuje.
- V konečné fázi prochází profil podávacím zařízením a je dělen na požadovanou délku.

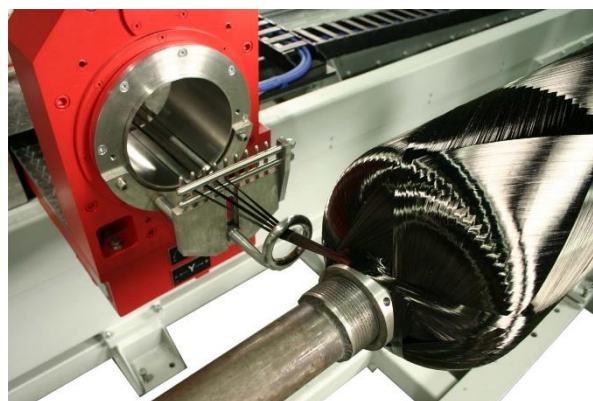


Obr. 25: Princip pultruze se znázorněným postupem [51]

2.8.8 Navíjení

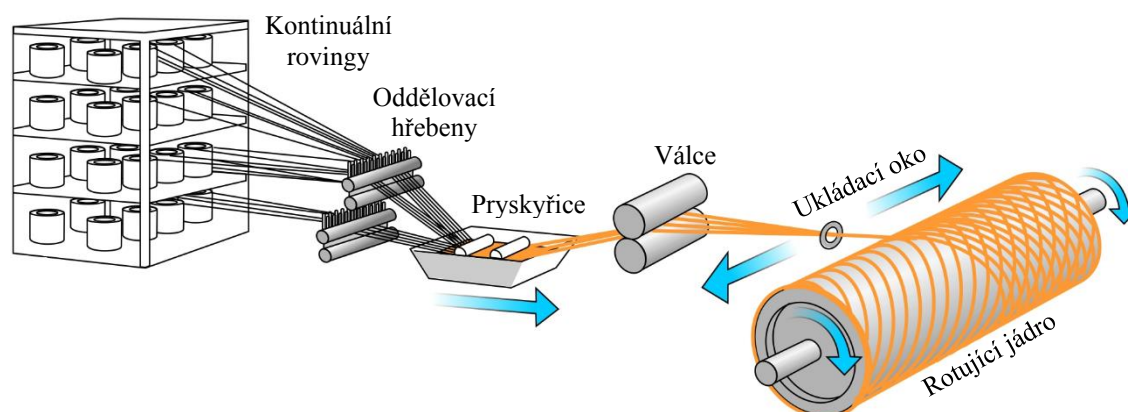
Při technologii navíjení se výztuž, většinou skleněné, ale i uhlíkové nebo aramidové pramence impregnované pojivem (polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice) ovíjejí na jádro (trn) ve tvaru výrobku.

Touto metodou se vyrábí kompozitní dutá tělesa (trubky, nádrže a nádoby různých tvarů), viz obr. 26. Pohyb ukládacího ramene podél osy za současné rotace trnu a poloha ukládacího oka dovolují přesné kladení vláken v několika osách, což dovoluje tvoření i relativně složitých tvarů. [44]



Obr. 26: Výroba nádoby navíjením [52]

Princip technologie je schématicky znázorněn na obr. 27.



Obr. 27: Princip technologie navíjení [53]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na výrobu hybridních kompozitních dílů technologií HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding). Kompozitní díly jsou desky složené ze 4, respektive 3 vrstev vláknové výztuže a polyuretanové matrice. Jako výztuž byla zvolena kombinace skelných vláken, uhlíkových vláken a aramidových vláken v různých strukturách, tj. kombinací materiálů, druhu textilií a její orientaci. Jednotlivé vrstvy textilií byly kladeny do formy v odlišných devíti variantách a následně nasyceny polyuretanem. Z hotových desek byla pomocí vodního paprsku vyřezána zkušební tělíska s rozměry dle příslušných ASTM norem pro zkoušku tahem, ohybem a dle ISO normy pro rázovou zkoušku (metoda Charpy). Výsledkem této části je zhodnocení a porovnání mechanických vlastností daných hybridních kompozitů v závislosti na kombinaci materiálů, druhu dané textilie a její orientaci.

3.1 Složení kompozitního systému

Kompozitní systém byl složen z polyuretanové matrice a textilní výztuže v různých kombinacích a orientacích. Konkrétní druh textilie, výrobce a základní parametry jsou uvedeny v tabulkách (tab. 4–9). Detaily struktur jednotlivých textilií jsou na obr. 28.

Tab 4: Skelná vlákna jednosměrná [59]

SAERTEX SAP No. 20000353				
Vrstva		Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
1	0°	E-glass 1200 tex	600	609
steh		PES 110 dtex	9	

Tab 5: Skelná vlákna biaxiální [60]

SAERTEX SAP No. 20006626				
Vrstva		Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
1	45°	E-glass 600 tex	617	1240
2	-45°	E-glass 600 tex	617	
steh		PES 76 dtex	6	

Tab 6: Uhlíková vlákna jednosměrná [61]

SGL Group Udo UD CS 600/1266				
Vrstva		Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
1	90°	50K carbon 3790 tex	600	606
steh		PES 76 dtex	6	

Tab 7: Uhlíková vlákna biaxiální [62]

SELCOM CBXS600				
Vrstva		Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
1	0°	50K carbon 3790 tex	300	609
2	90°	50K carbon 3790 tex	300	
steh	0°	PES 83 dtex	9	

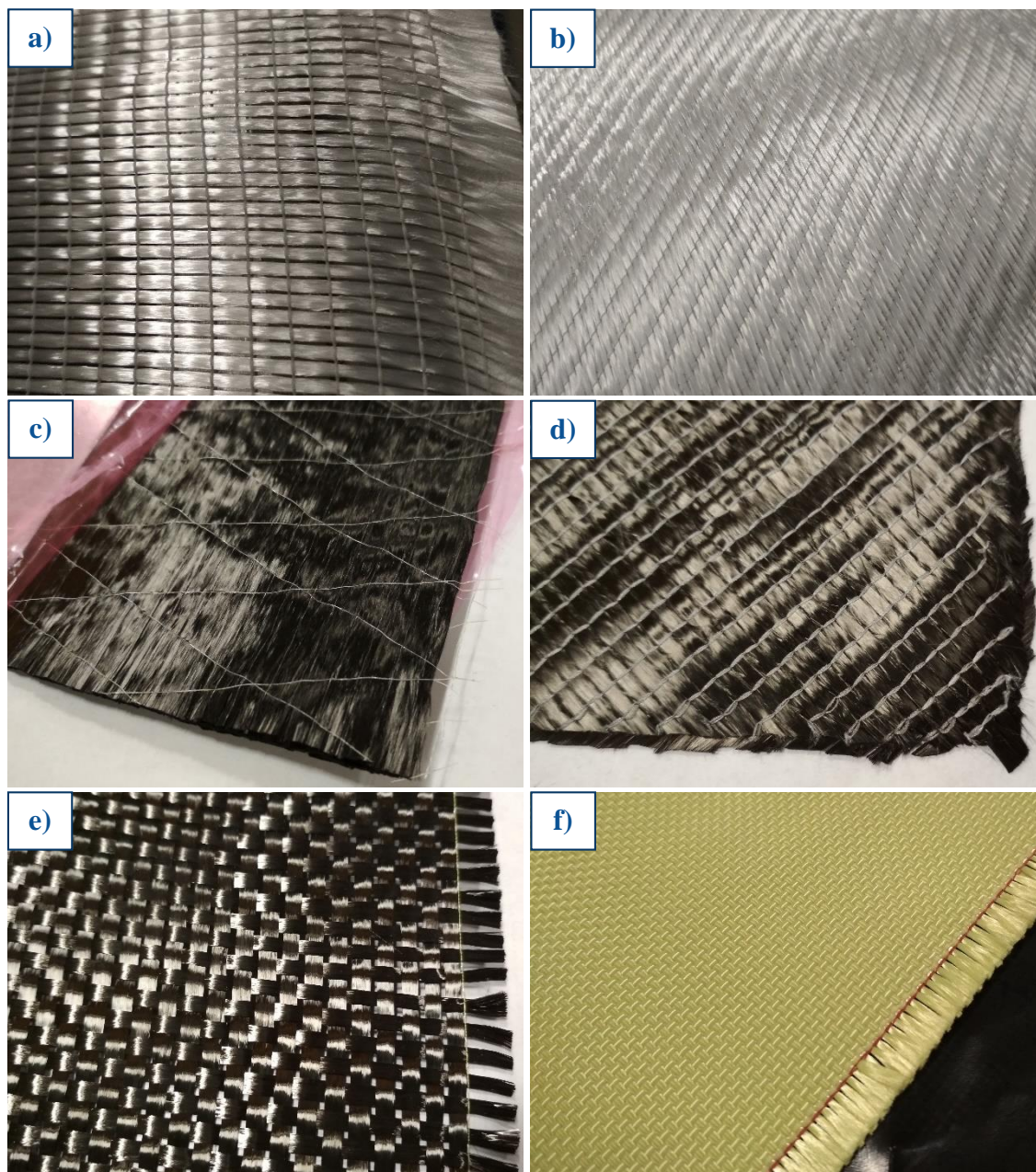
Tab 8: Uhlíková tkanina typu plátno [63]

GRM Systems GG 400 P			
Plátno	Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
osnova	6K carbon 400 tex	200	400
útek	6K carbon 400 tex	200	

Tab 9: Aramidová tkanina typu plátno [64]

TEIJIN Twaron® T 750/2			
Plátno	Materiál	Plošná hmotnost [g/m ²]	Celková plošná hmotnost [g/m ²]
osnova	3360 dtex, f2000, Twaron 1000	230	460
útek	3360 dtex, f2000, Twaron 1000	230	

Pozn.: Jednotka tex se užívá v textilním průmyslu pro jemnost příze a představuje délkovou hustotu, 1 tex představuje 1 gram hmotnosti na 1 kilometr délky [tex = g/km]. Jemnost chemických textilních vláken se udává nejčastěji v desetinách texu, tedy decitexech [dtex]. [54]



Obr. 28: Detaily struktur použitých textilií

- a) skelná vlákna jednosměrná; b) skelná vlákna biaxiální;
c) uhlíková vlákna jednosměrná; d) uhlíková vlákna biaxiální;
e) uhlíková tkanina typu plátno; f) aramidová tkanina typu plátno

Matricí kompozitního systému byl polyuretan (PUR) od společnosti BASF s obchodním označením Elastolit® R 8819/104/LT, určený pro technologii RTM. Tento materiál se skládal ze dvou složek, isokyanátu (na bázi karbodiimidu, methylen-difenyl-diisokyanátu, difenylmethanu, diisokyanátu) a polyolu (na bázi polyolů, katatalyzátoru a stabilizačních činidel). [58] Typické vlastnosti čistého polyuretanu jsou uvedeny v tab. 10.

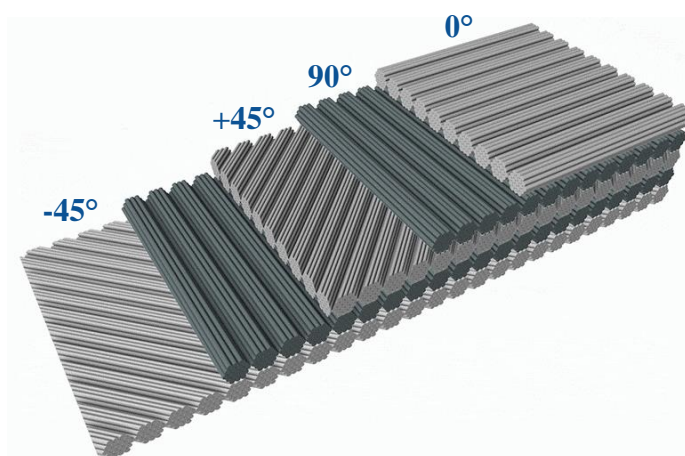
Tab 10: Typické vlastnosti čistého polyuretanu [58]

Hustota	[kg/m ³]	1170
Tvrdost Shore D	[-]	83
Pevnost v tahu	[MPa]	77
Poměrné prodloužení při přetržení	[%]	6
Modul pružnosti v ohybu (při 23 °C)	[MPa]	2420
Pevnost v ohybu	[MPa]	105

Zvoleno bylo devět struktur kompozitních materiálů (značeno písmeny A–I), přičemž A–C se skládají pouze ze skelných vláken (GF), D–G jsou hybridní kompozity skelných a uhlíkových vláken (CF) a H–I jsou hybridní kompozity ze skelných a aramidových vláken (AR). Složení vrstev daného kompozitu je uvedeno v tab. 11, kde je označena orientace vláken, materiál a druh textile. Konkrétně 0° a 90° jsou vlákna jednosměrná, ±45° vlákna biaxiální a „plain“ je tkanina typu plátno. Smysl orientace vláken v kompozitním materiálu je na obr. 29.

Tab. 11: Jednotlivé vrstvy výztuže kompozitů

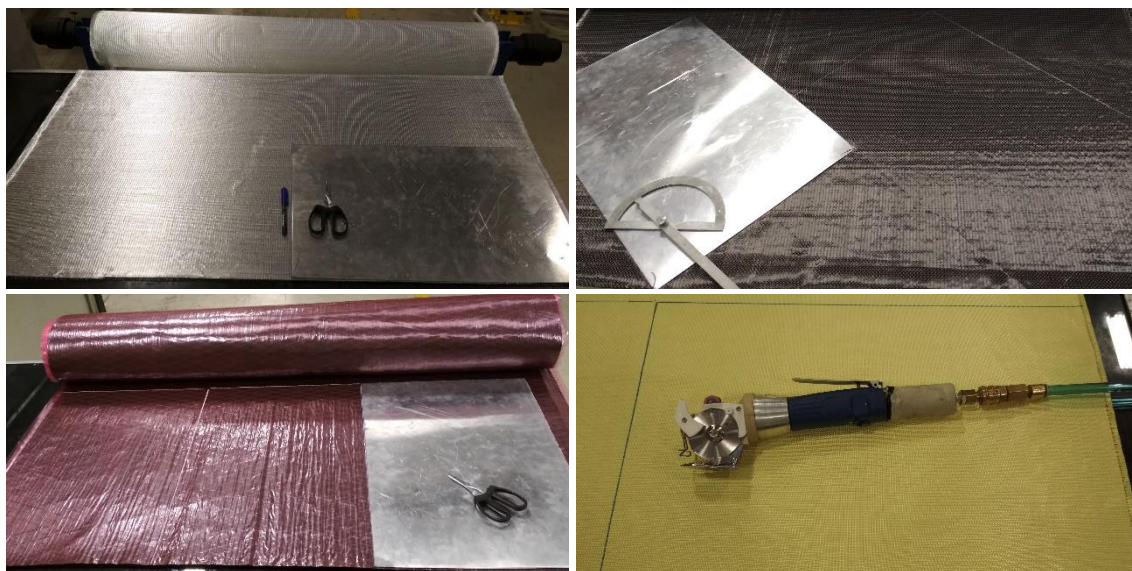
Kompozit	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva	4. vrstva	Hmotnostní podíl vláken [%]
A	0° GF	0° GF	0° GF	0° GF	49
B	0° GF	90° GF	90° GF	0° GF	49
C	0° GF	±45° GF	0° GF		49
D	0° GF	0° CF	0° GF		42
E	0° GF	90° CF	0° GF		42
F	0° GF	±45° CF	0° GF		42
G	0° GF	plain CF	0° GF		39
H	0° GF	plain AR	0° GF		40
I	plain AR	0° GF	0° GF	plain AR	46



Obr. 29: Smysl orientace vláken v kompozitu [55]

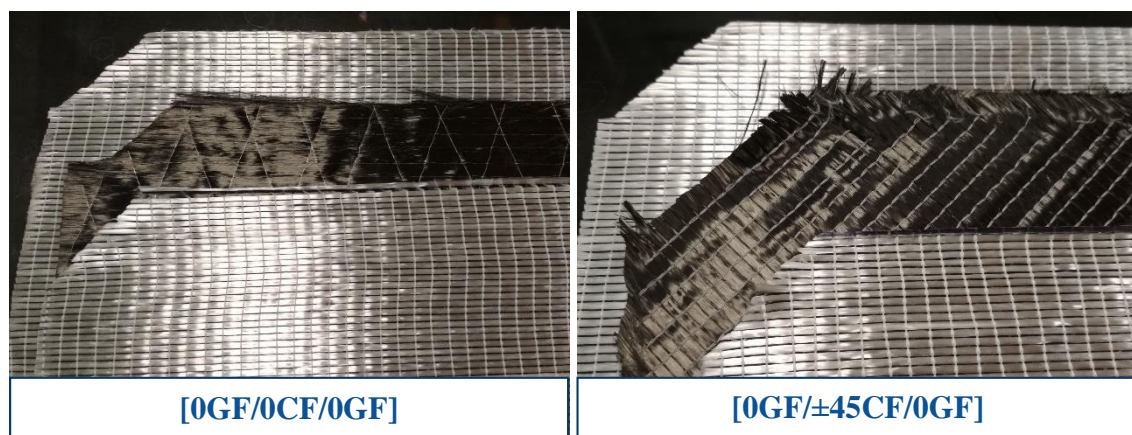
3.2 Příprava textilní výztuže

Příprava textilní výztuže (přístřihů) spočívala v překreslení rozměrů šablony v dané orientaci na příslušnou textilií odvíjenou z role a následném vystřížení nůžkami, respektive vyříznutí pneumatickou kotoučovou řezačkou. Použité pomůcky a příklady rozvržení jsou na obr. 30.



Obr. 30: Použité pomůcky a příklady rozvržení

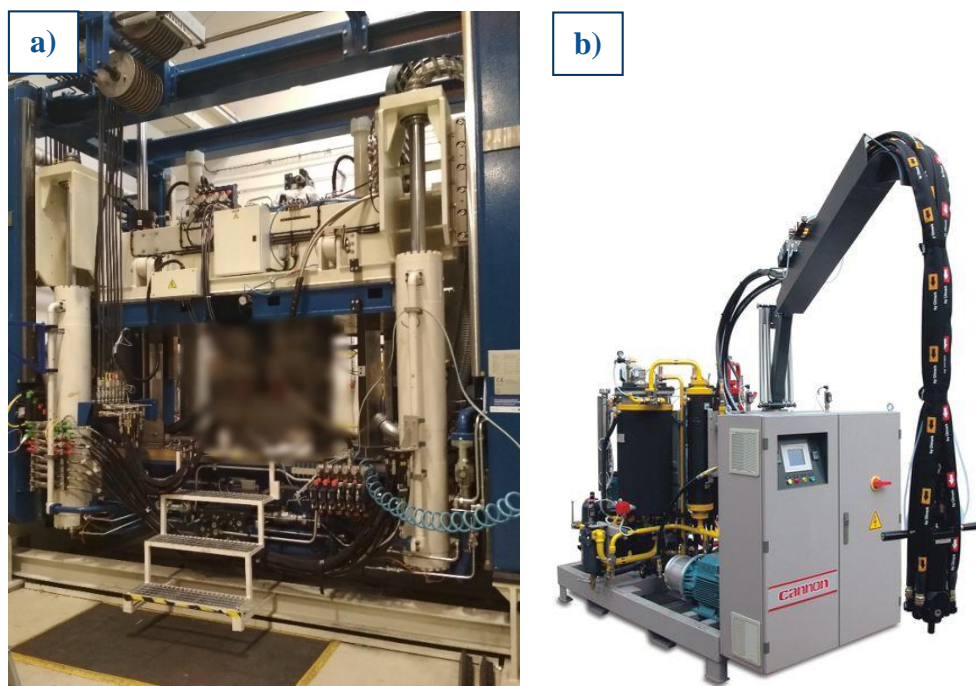
Dutina formy měla rozměry 600 mm x 400 mm, kterým odpovídala pomocná šablona, avšak z důvodu umístění vtoku a pinů (držící textilií na správné pozici v dutině formy), měla hotová kompozitní deska použitelnou část menší, a to s rozměry 500 mm x 300 mm. Aby textilie nepřesahovaly v zaoblení dutiny formy, byly rohy zastřiženy. Příklad připravených přístřihů textilní výztuže je na obr. 31.



Obr. 31: Příklady vrstev textilní výztuže

3.3 Výroba kompozitních desek technologií HP-RTM

Výroba kompozitních desek probíhala ve spolupráci s firmou Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. Pro výrobu byla použita dvoudílná ocelová forma s pevnou spodní částí a pohyblivou horní částí, která byla umístěna v hydraulickém lisu, viz obr. 32a. Jelikož konstrukce formy podléhá utajení, není zde další popis ohledně její konstrukce a na fotkách jsou forma a její detaily rozostřeny. Komponenty polyuretanové matrice (polyol a isokyanát) byly dávkovány jednotkou Cannon (obráz. 32b). Ohřev formy byl zajištěn temperačním zařízením, v kterém cirkulovala voda o teplotě 85 °C temperačními kanály umístěnými v oblasti tvarové dutiny formy. [10]

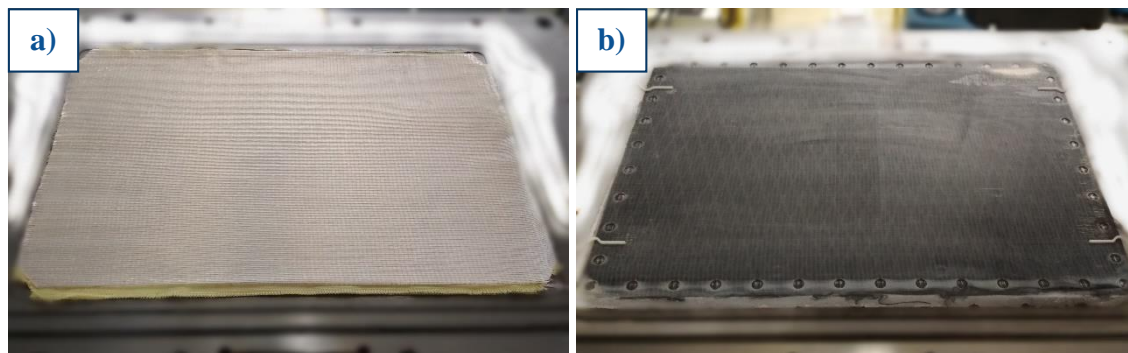


Obr. 32: Zařízení pro technologie HP-RTM
a) hydraulický lis; b) dávkovací jednotka Cannon [65]

Proces výroby spočíval v nanesení separačního prostředku pro snadné odformování dílu (desky) na spodní i horní část formy. Dalším krokem bylo kladení textilních přístřihů ve vrstvách stanovených pro danou strukturu kompozitu (viz tab. 11) do tvarové dutiny spodní části formy. Následně byla forma uzavřena nastavenou uzavírací silou a pomocí dvou vakuových ventilů byl z kavity formy odsát vzduch. V dalším kroku začalo vstřikování polyuretanu do dutiny formy a prosycování textilní výztuže. To bylo ukončeno po dosažení určité hodnoty tlaku. Po vytvrzení polyuretanové matrice byla forma otevřena a deska vyjmuta. Dutina formy byla od přetoků a zbytků polyuretanu očištěna tlakovým vzduchem. Základní procesní parametry jsou v tab. 12. Na obr. 33 je průběh výroby kompozitní desky.

Tab. 12: Základní procesní parametry

Tlak v mísící hlavě [MPa]	Velikost dávky [g]	Vstřikovací rychlost [g/s]	Teplota komponent [°C]	Doba vytvrzování [s]	Uzavírací síla [N]
15	600	50	23	360	1500



Obr. 33: Výroba kompozitní desky

a) textilní výztuž založená ve formě; b) hotová kompozitní deska

Procesní parametry (tab. 12) byly zvoleny za základě dřívějšího zkoušení a odladěny při výrobě předchozích kompozitních desek. Na obr. 34 je nedokonale prosycená deska. To bylo způsobeno příliš velkým objemovým množstvím textilií v dutině formy. Proto nebylo možné vyrobit kompozitní struktury s uhlíkovými a aramidovými vlákny se čtyřmi vrstvami, ale jen třemi. Ani při změně procesních parametrů nebylo možné tak velký objem textilií prosytit. Změna nastavení spočívala v prodloužení doby odsávání vzduchu z dutiny formy před vstřikováním,

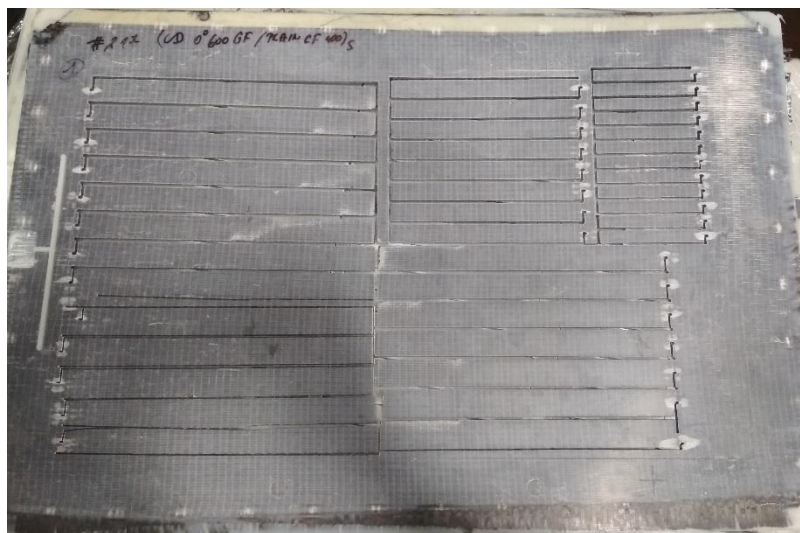


Obr. 34: Nedokonale prosycená deska

aby došlo k co nejmenšímu nahromadění vzduchu v kavitě a tím bylo tečení materiálu snazší. Dále byla snížena rychlost vstřikování (na 25 g/s), aby došlo k pomalejšímu a rovnoměrnějšímu plnění dutiny formy a pomalejšímu nárůstu tlaku, tzn. delší dobu vstřikování a větší vstříknutou dávkou.

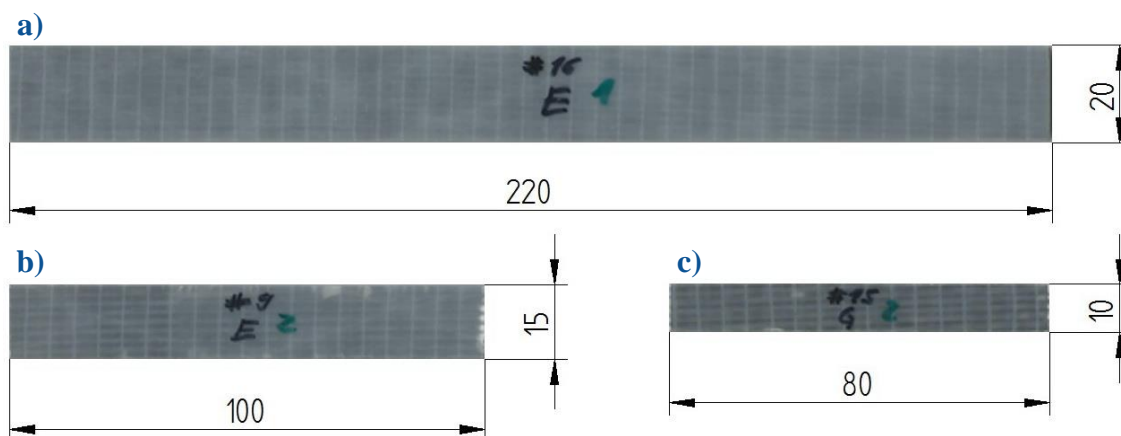
3.4 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly z kompozitních desek vyřezány pomocí vodního paprsku na CNC zařízení PTV WJ3020. Řezání bylo zajištěno společností BMTO GROUP. Ukázka desky s vyřezanými vzorky, které bylo nutno z desky vylámat, resp. vyřezat a následně začistit, je na obr. 35.



Obr. 35: Kompozitní deska s vyřezanými zkušebními vzorky

Tvar a rozměry zkušebních vzorků byly stanoveny z norem pro příslušné zkoušky. Konkrétně podle: ASTM D3039/D3039M – 17 pro zkoušku tahem, ASTM D 709 – 03 pro zkoušku ohybem a ISO 179-1 pro rázovou zkoušku. Na obr. 36 jsou zkušební vzorky pro zkoušky se zakótovanými rozměry. Tloušťka všech desek, respektive vzorků, byla 2 mm. Reálné rozměry zkušebních vzorků byly před zkouškami změřeny, šířka digitálním posuvným měřítkem a tloušťka dotykovým měřidlem, obojí značky Mitutoyo.



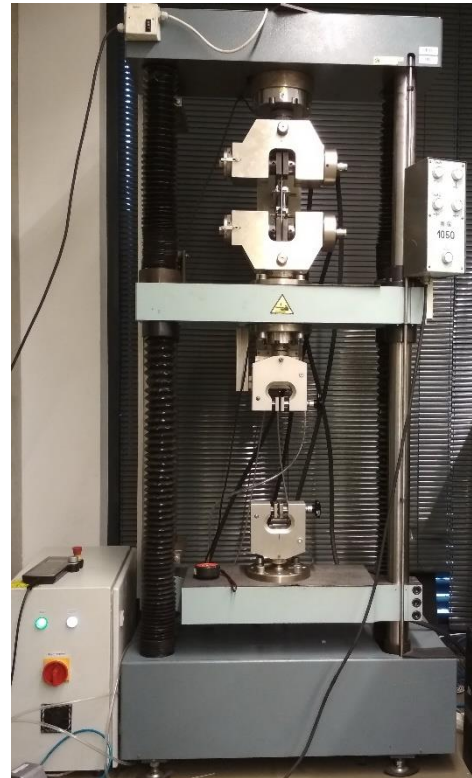
Obr. 36: Rozměry zkušebních vzorků pro:
a) zkoušku tahem; b) zkoušku ohybem; c) rázovou zkoušku

3.5 Stanovení tahových vlastností

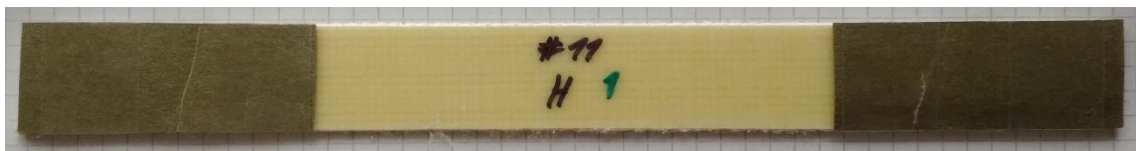
Při tahové zkoušce je zkušební těleso protahováno ve směru hlavní osy konstantní rychlostí do jeho porušení [56]. Zkouška tahem je popsána normou ASTM D3039/D3039M – 17, která je určena pro kompozitní materiály s polymerní matricí.

Statická zkouška tahem byla provedena na trhacím zařízení TIRA test 2300 (obr. 37) se snímací hlavou 100 kN a průtahoměrem MFN-A. Hodnoty byly zaznamenávány softwarem LabNET, kde byly nastaveny následující zkušební parametry: rychlost zatěžování $v = 2 \text{ mm/min}$, počáteční měřená délka pomocí průtahoměru $L_0 = 50 \text{ mm}$, velikost předpětí a rozměry zkušebního vzorku.

Zkušební vzorky o rozměrech $220 \times 20 \times 2 \text{ mm}$ (délka x šířka x tloušťka) byly opatřeny v místech upnutí do čelistí smirkovým papírem (viz obr. 38) kvůli eliminaci prokluzování vzorků v čelistech, resp. kvůli snížení vneseného napětí v oblasti upnuté části.



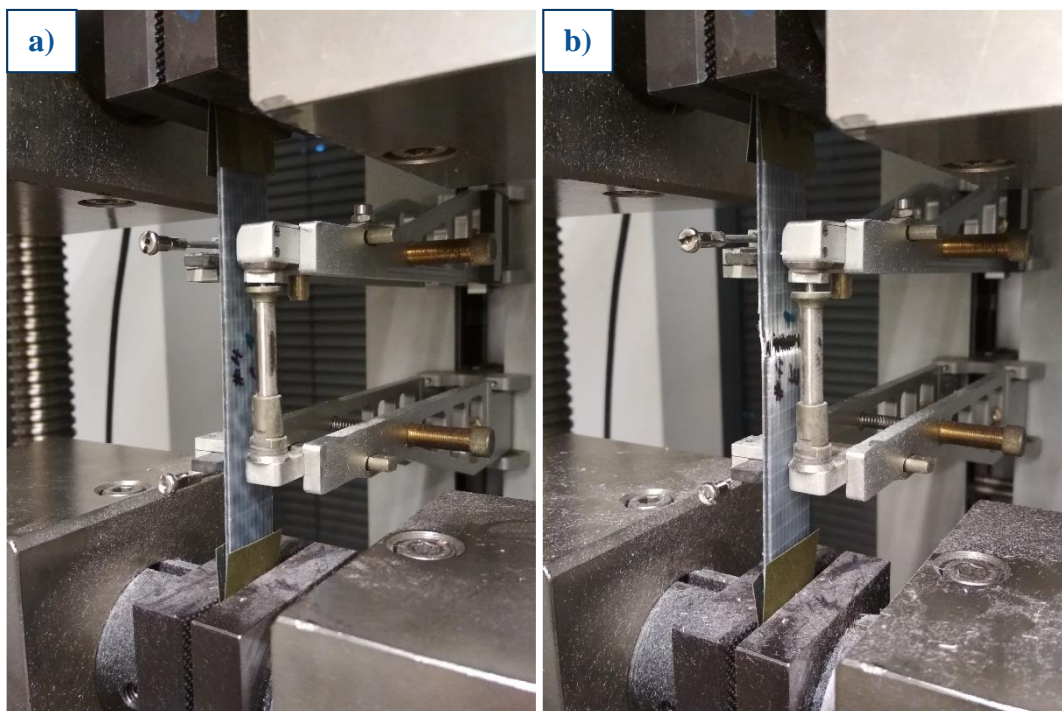
Obr. 37: Trhací zařízení TIRA test



Obr. 38: Zkušební vzorek opatřený smirkovým papírem

Jednotlivé vzorky daných kompozitních struktur byly postupně upevňovány do čelistí trhacího zařízení, opatřeny průtahoměrem a zatěžovány konstantní rychlostí. V průběhu měření byla zaznamenávána zatěžující síla F a zvětšení počáteční měřené délky ΔL_0 . Výsledkem zkoušky bylo stanovení hodnot modulu pružnosti v tahu E_t , meze pevnosti v tahu σ_m , poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu ε_m .

Následující obrázky ukazují upnutí zkušební vzorku se smirkovým papírem v čelistech trhačího zařízení. Na obr. 39a je zkušební vzorek s průtahoměrem MFN-A před zkouškou a na obr. 39b přetržený vzorek po zkoušce tahem.



Obr. 39: Upnutý zkušební vzorek v čelistech opatřený průtahoměrem
a) před zkouškou; b) po zkoušce

Hodnoty meze pevnosti v tahu σ_m a poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu ε_m byly odečteny ze softwaru LabNET. Napětí σ a poměrné prodloužení ε bylo vypočítáno dle vztahů (1) a (2). Modul pružnosti v tahu E_t byl určen jako sečna ke křivce při poměrném prodloužení 0,1 % a 0,3 % a dopočítán dle vztahu (3).

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot h} [MPa] \quad (1)$$

kde: F [N] – naměřená zatěžující síla;
 b [mm] – šířka zkušební vzorku;
 h [mm] – tloušťka zkušební vzorku.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

kde: ΔL_0 [mm] – zvětšení počáteční měřené délky;
 L_0 [mm] – počáteční měřená délka pomocí průtahoměru.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (3)$$

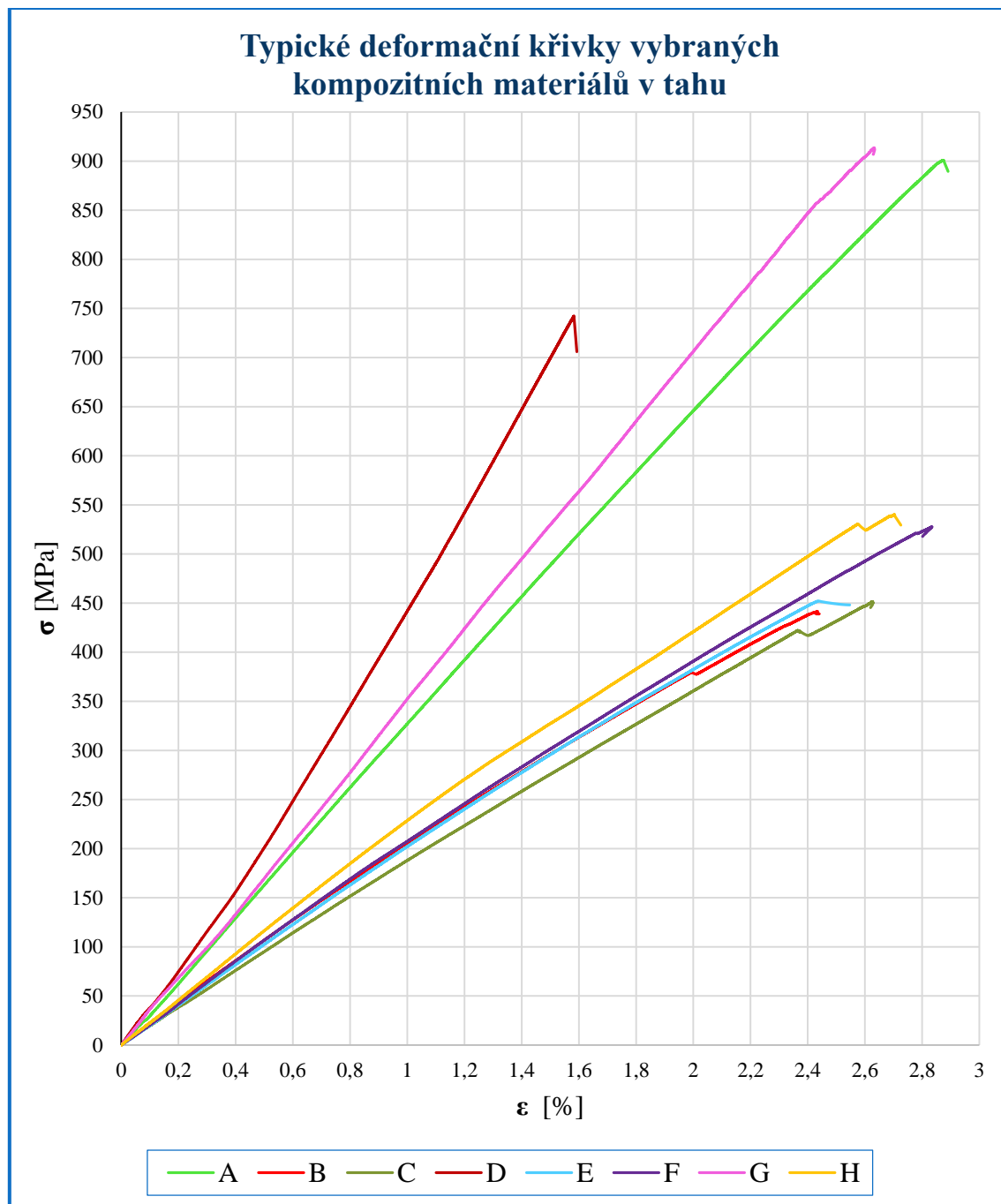
kde: σ_1 [MPa] – napětí, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,1 %;
 σ_2 [MPa] – napětí, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,3 %;
 ε_1 [%] – poměrné prodloužení 0,1 %;
 ε_2 [%] – poměrné prodloužení 0,3 %.

Testováno bylo od každé struktury kompozitního materiálu (A–H) a čistého polyuretanu (0) pět vzorků. Průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek pro mez pevnosti v tahu σ_m , poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu ε_m a modulu pružnosti v tahu E_t jsou v tab. 13.

Tab. 13: Statistika tahových vlastností

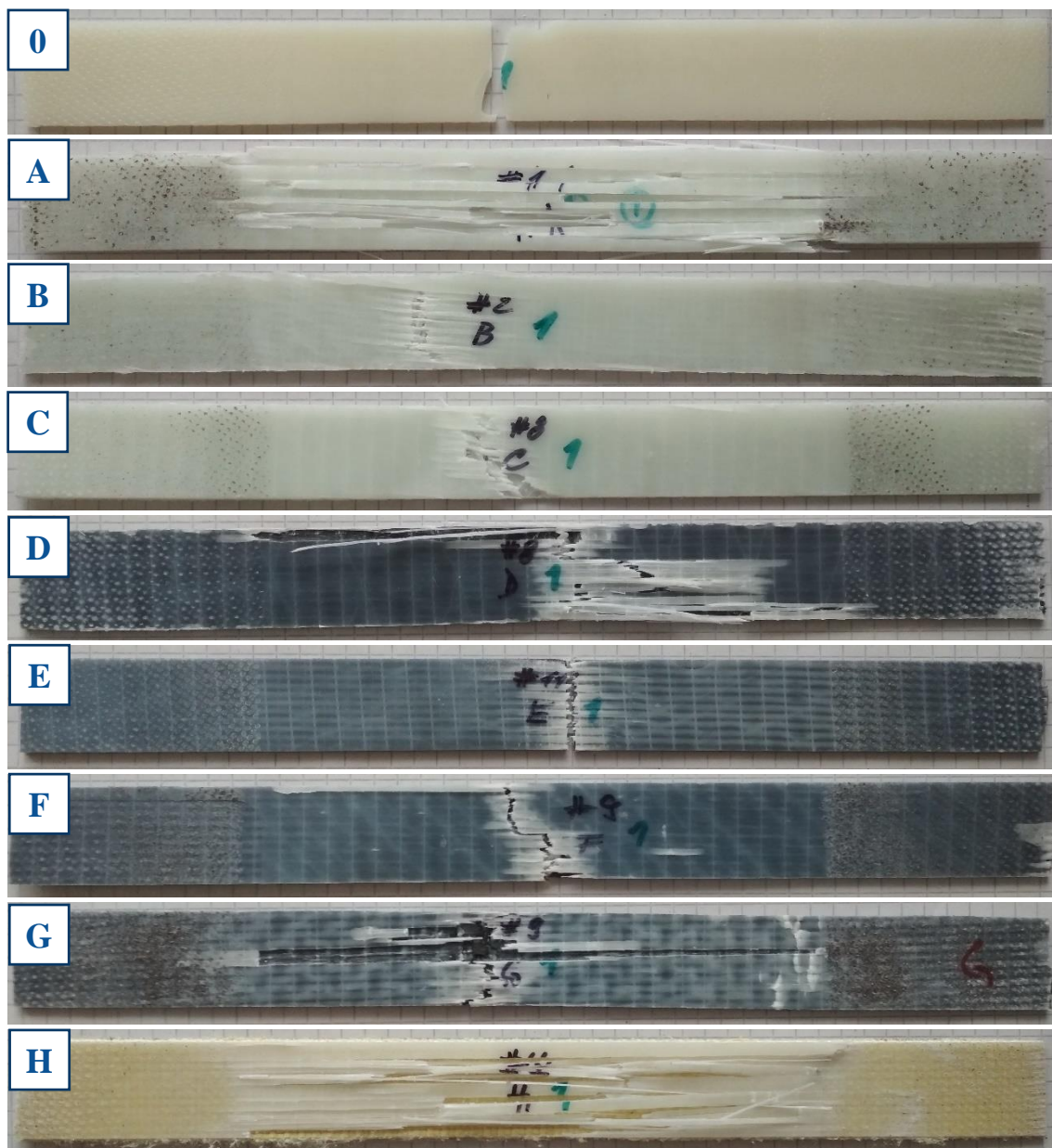
Materiál	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
0 polyuretan	56 ± 3	$4,1 \pm 0,5$	2414 ± 98
A [0GF/0GF/0GF/0GF]	895 ± 20	$2,9 \pm 0,1$	32948 ± 542
B [0GF/90GF/90GF/0GF]	452 ± 16	$2,7 \pm 0,2$	19928 ± 329
C [0GF/ ± 45 GF/0GF]	452 ± 7	$2,6 \pm 0,1$	20268 ± 378
D [0GF/0CF/0GF]	767 ± 21	$1,6 \pm 0,2$	45650 ± 1942
E [0GF/90CF/0GF]	465 ± 9	$2,6 \pm 0,2$	19251 ± 280
F [0GF/ ± 45 CF/0GF]	526 ± 11	$2,9 \pm 0,2$	20387 ± 347
G [0GF/plainCF/0GF]	923 ± 37	$2,4 \pm 0,2$	31797 ± 1488
H [0GF/plainAR/0GF]	520 ± 7	$2,7 \pm 0,1$	23168 ± 309

Typické deformační křivky vybraných kompozitních materiálů v tahu (závislost tahového napětí na poměrném prodloužení) jsou na obr. 40. Jednotlivé křivky znázorňují daný druh kompozitní struktury, značené písmeny A–H. Materiál, druh textilie a její orientace jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 40: Typické deformační křivky vybraných kompozitních materiálů v tahu

Přetržené zkušební vzorky kompozitních materiálů A–H (0 je čistý polyuretan) jsou zobrazeny na obr. 41, kde je ukázáno porušení (praskliny), lišící se v závislosti na materiálu, druhu textilie a orientaci vláken ve vrstvách kompozitu.



Obr. 41: Porušení kompozitních materiálů po zkoušce tahem

3.6 Stanovení ohybových vlastností

Při ohybové zkoušce je zkušební těleso volně podepřeno dvěma podpěrami a zatěžováno přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí. Jedná se tedy o třibodový ohyb. Zkouška je popsána normou ASTM D 790 – 03, která je určena pro vyztužené plasty.

Rozměry zkušebních vzorků byly vypočítány z poměru rozpětí podpěr a tloušťky (32 : 1). Tato hodnota je doporučena pro vyztužené plasty o vysoké pevnosti. Tloušťce vzorku 2 mm odpovídá rozpětí podpěr 64 mm. Konečné rozměry vzorku jsou tedy, 100 x 15 x 2 mm (délka x šířka x tloušťka). [10]

Zkouška ohybem byla provedena na zkušebním zařízení TIRA test 2300 se snímací hlavou 10 kN. Zařízení bylo ve spodní části opatřeno válečkovými podpěrami (průměr 15 mm) a snímačem průhybu. Na horním pohyblivém příčniku byl umístěn přitlačný trn (viz obr. 42). Hodnoty byly zaznamenávány softwarem LabNET, kde byly nastaveny následující parametry: rozměry zkušebního vzorku, rozpětí podpěr $L = 64$ mm, velikost předpětí a rychlost zatěžování v , která byla určena ze vztahu (4).

$$v = \frac{Z \cdot L^2}{6h} \text{ [mm/min]} \quad (4)$$

$$v = \frac{0,01 \cdot 64^2}{6 \cdot 2} = 3,41 \text{ [mm/min]}$$

kde: Z [–] – rychlost deformace;
 L [mm] – rozpětí podpěr;
 h [mm] – tloušťka zkušebního vzorku.

Poté byla dle tabulkových hodnot vybrána rychlost zatěžování 2 mm/min, která se nejvíce blížila rychlosti deformace 1 % za minutu. [10] V průběhu zkoušky byly zaznamenávány hodnoty zatěžující síly F a průhybu s . Hodnoty napětí v ohybu σ_f a deformace ohybem ε_f byly vypočítány podle vztahů (5) a (6). Modul pružnosti v ohybu E_f byl určen jako sečna ke křivce při poměrném prodloužení 0,05 % a 0,25 % a dopočítán dle vztahu (7).

$$\sigma_f = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

kde: F [N] – naměřená zatěžující síla;
 b [mm] – šířka zkušebního vzorku.

$$\varepsilon_f = \frac{6s \cdot h}{L^2} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

kde: s [mm] – průhyb.

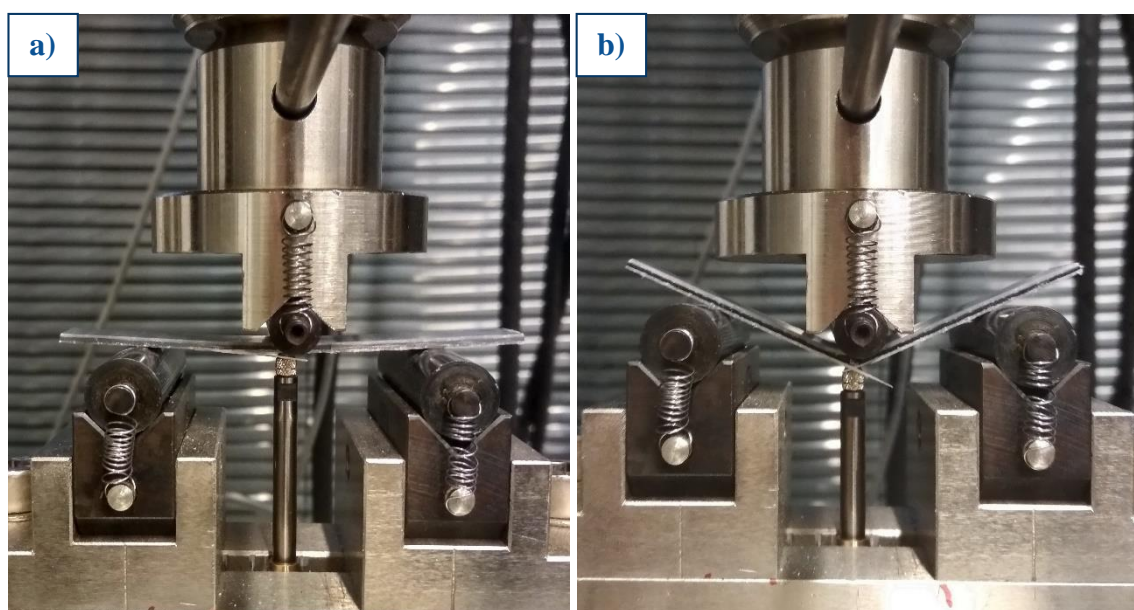
$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} [MPa] \quad (7)$$

kde: σ_{f1} [MPa] – napětí, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 %;

σ_{f2} [MPa] – napětí, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,25 %;

ε_{f1} [%] – deformace ohybem 0,05 %;

ε_{f2} [%] – deformace ohybem 0,25 %.



Obr. 42: Tříbodový ohyb – umístění vzorku na podpěrách a snímači průhybu
a) v průběhu zkoušky; b) po zkoušce

U houževnatých materiálů (v tomto případě čistý polyuretan), které nedosáhnou meze pevnosti do 5% deformace ohybem, se stanovuje mez pevnosti σ_{fC} na limitní hodnotě deformace ohybem 5 %. Ukázka průhybu čistého polyuretanu je na obr. 43.



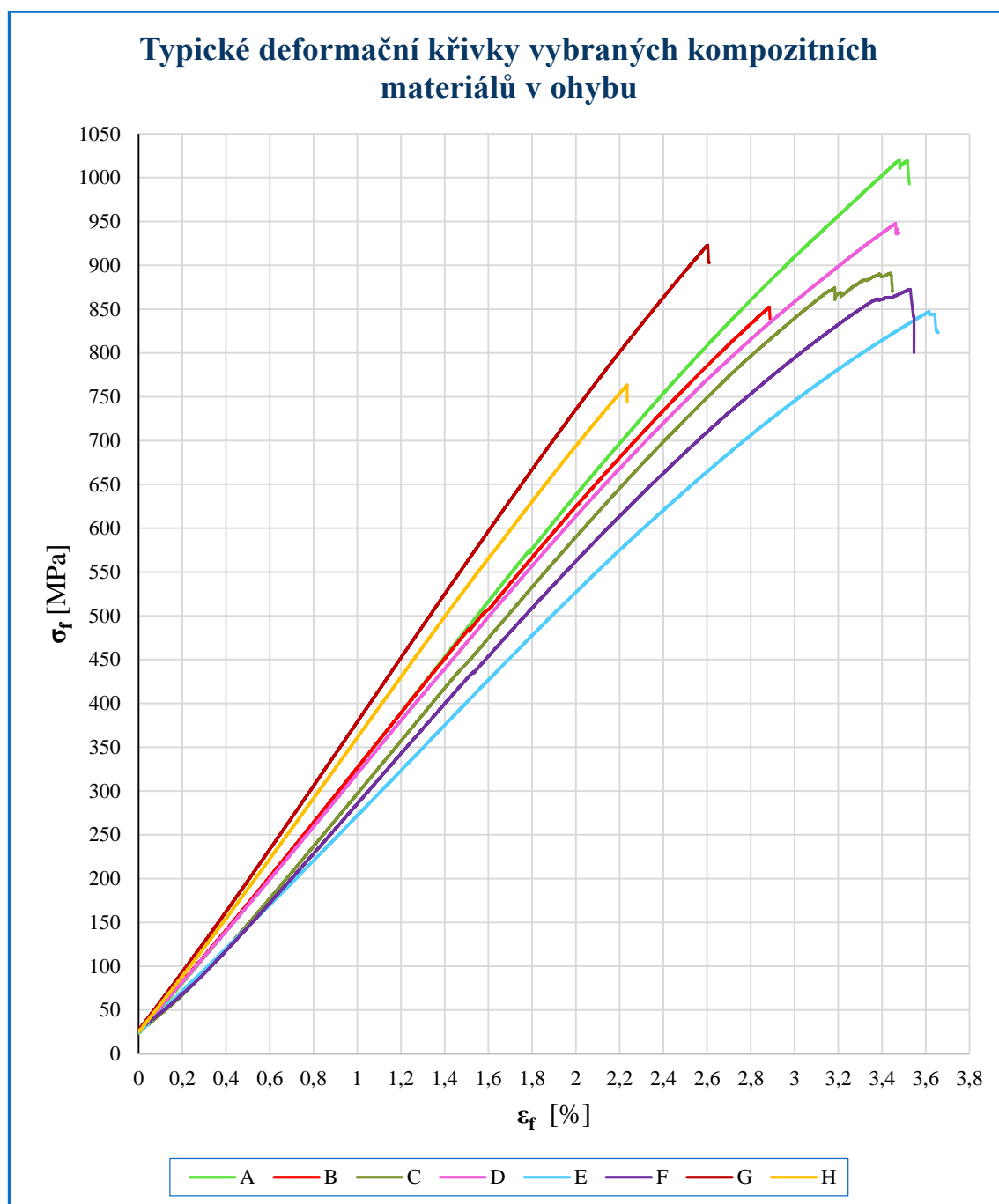
Obr. 43: Třibodový ohyb – čistý polyuretan

Od každého materiálu (0–H) bylo testováno pět vzorků. Průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek pro mez pevnosti v ohybu σ_{fm} a modulu pružnosti v ohybu E_f jsou v tabulce (tab. 14).

Tab. 14: Statistika ohybových vlastností

Materiál	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
0 polyuretan	–	2860 ± 171
A [0GF/0GF/0GF/0GF]	1058 ± 34	29917 ± 209
B [0GF/90GF/90GF/0GF]	878 ± 22	27817 ± 125
C [0GF/±45GF/0GF]	890 ± 10	22063 ± 432
D [0GF/0CF/0GF]	937 ± 63	26858 ± 1063
E [0GF/90CF/0GF]	846 ± 27	23582 ± 1066
F [0GF/±45CF/0GF]	878 ± 30	20955 ± 2005
G [0GF/plainCF/0GF]	946 ± 27	34988 ± 1181
H [0GF/plainAR/0GF]	743 ± 24	31026 ± 586

Typické deformační křivky kompozitních materiálů v ohybu (závislost ohybového napětí na deformaci ohybem) jsou na obr. 44. Jednotlivé křivky znázorňují struktury, značené písmeny A–H. Materiál, druh textilie a její orientace jsou uvedeny v tab. 11.

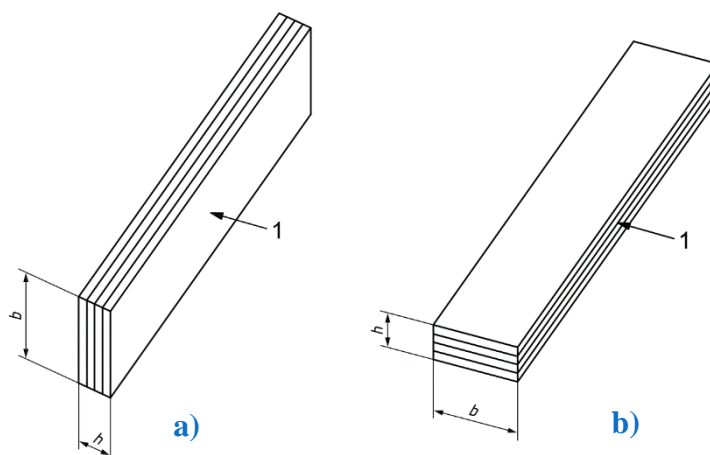


Obr. 44: Typické deformační křivky kompozitních materiálů v ohybu

3.7 Stanovení rázových vlastností (metoda Charpy)

Při metodě Charpy je zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách a je přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami. Rázová houževnatost je definována jako kinetická energie E_c spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa vztahovaná na jeho původní průřez. [11]

Zkouška je popsána normou ISO 179-1, která je vhodná pro kompozity plněné vlákny na bázi termoplastů a reaktoplastů. Pro kompozitní materiály lze použít zkušební tělesa bez vrubu a vzorky je možné přerážet ve dvou metodách. První z metod je normálový ráz na širší stranu (flatwise normal „fn“), druhou je rovnoběžný ráz na užší stranu (edgewise parallel „ep“). Schémata těchto dvou orientací zkušební vzorku se směrem rázu a zakótovanými rozměry jsou na obr. 45.



Obr. 45: Orientace vzorku se směrem rázu [57]

a) normálový ráz na širší stranu (fn); b) rovnoběžný ráz na užší stranu (ep)

V diplomové práci byla zkouška provedena metodou „ep“ (rovnoběžný ráz na užší stranu), na zkušebním zařízení Zwick Roell 50P (obr. 46) s rázovým kladivem o nominální energii 50 J. Rychlost dopadu kladiva byla 3,8 m/s. Kalibrace zařízení z hlediska tření byla provedena dle normy ISO 13802. Během zkoušky byla zaznamenávána kinetická energie spotřebovaná k přeražení zkušební vzorku E_c a výsledná rázová houževnatost a_{cU} vypočítána dle vztahu (8).

$$a_{cu} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 [kJ/m^2] \quad (8)$$

- kde: E_c [J] – energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa;
 h [mm] – tloušťka zkušebního vzorku;
 b [mm] – šířka zkušebního vzorku.



Obr. 46: Zkušební zařízení Zwick Roell 50P

Umístění zkušebního vzorku o rozměrech 80 x 10 x 2 mm (délka x šířka x tloušťka) na podpěrách v orientaci „ep“ je znázorněno na obr. 47.



Obr. 47: Umístění zkušebního vzorku na podpěrách

Testováno bylo od každého materiálu osm vzorků. Průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek pro rázovou houževnatost a_{cU} jsou uvedeny v tab. 15. Ukázka porušení jednotlivých kompozitních struktur je na obr. 48.

Tab. 15: Statistika naměřených hodnot rázové houževnatosti

Materiál	a_{cU} [kJ/m²]
O polyuretan	50,3 ± 8,3
A [0GF/0GF/0GF/0GF]	280,0 ± 15,5
B [0GF/90GF/90GF/0GF]	161,1 ± 20,5
C [0GF/±45GF/0GF]	311,3 ± 24,7
D [0GF/0CF/0GF]	152,6 ± 17,9
E [0GF/90CF/0GF]	296,4 ± 17,3
F [0GF/±45CF/0GF]	267,4 ± 5,8
G [0GF/plainCF/0GF]	153,6 ± 9,7
H [0GF/plainAR/0GF]	168,8 ± 7,5
I [plainAR/0GF/0GF/plainAR]	239,9 ± 13,4



Obr. 48: Přeražené zkušební vzorky

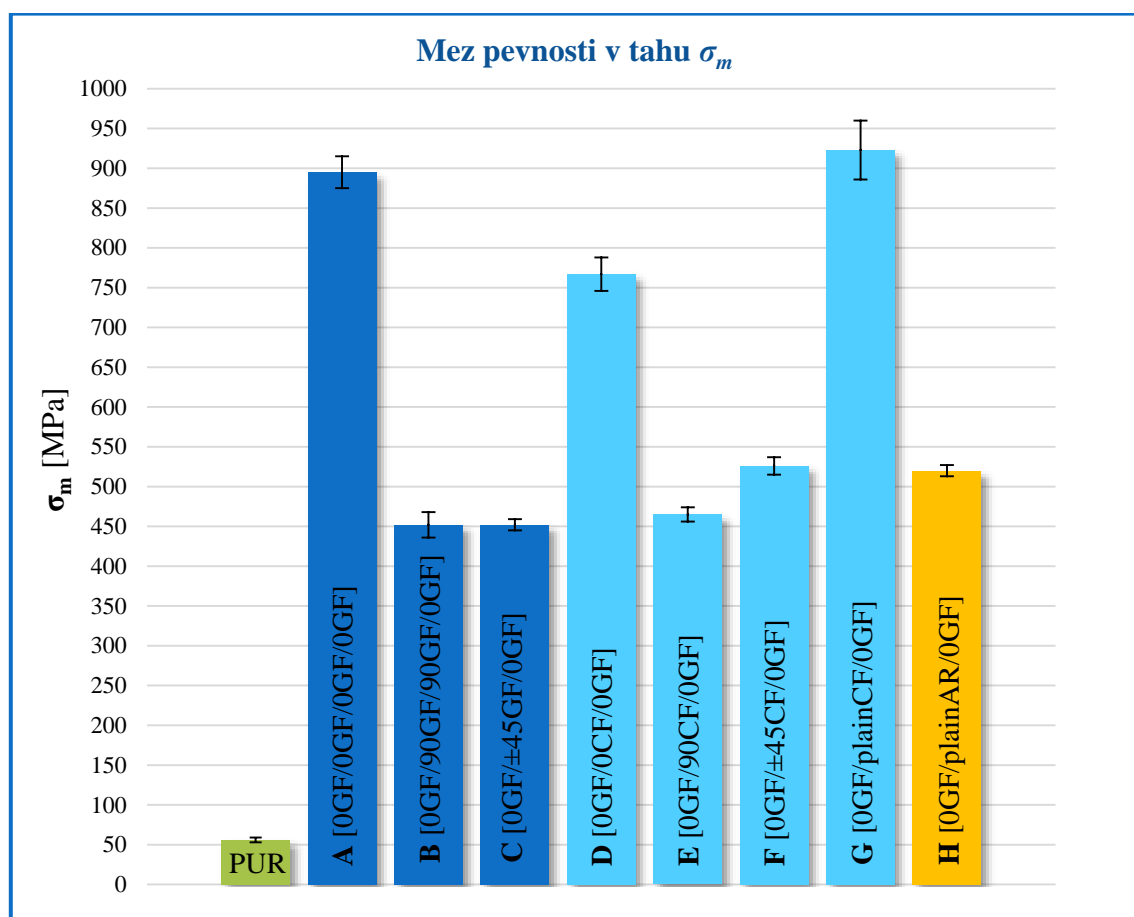
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Hodnoty mechanických vlastností pro zkoušku tahem, zkoušku ohybem a rázovou zkoušku jsou porovnávány z hlediska materiálu výztuže (sklo, uhlík, aramid), orientace výztuže (0° , $\pm 45^\circ$, 90°) a druhu výztuže (vlákna, tkanina). Výsledky včetně směrodatných odchylek jsou graficky znázorněny na obr. 49–54. Konkrétní naměřené hodnoty jsou v přílohách 1–18.

4.1 Tahové vlastnosti

Zkouška tahem byla provedena dle normy ASTM D3039/D3039M – 17. Výsledkem byly hodnoty meze pevnosti v tahu σ_m , poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu ε_m a modulu pružnosti v tahu E_t .

4.1.1 Mez pevnosti v tahu



Obr. 49: Mez pevnosti pro vybrané kompozity

Z obr. 49 je patrné, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu σ_m dosáhl hybridní kompozit „G“ [0GF/plainCF/0GF], složený ze skelných a uhlíkových vláken. Při této kombinaci materiálu byla průměrná mez pevnosti 923 MPa. Této hodnotě se nejvíce blížil kompozit „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF], který byl složený pouze ze skelných vláken a bylo u něj dosaženo meze pevnosti 895 MPa. Oproti tomu hybridní kompozit „D“ [0GF/0CF/0GF] složený ze skelných a uhlíkových vláken, měl mez pevnosti o 15 % nižší. Naopak špatné vlastnosti měla struktura „H“ [0GF/plainAR/0GF], kde kombinace skelných vláken a aramidových vláken s polyuretanovou matricí vykazovala špatnou soudržnost. Důsledkem špatné adheze matrice k aramidu, bylo možné jednotlivé vrstvy textilií od sebe oddělit. Mez pevnosti této struktury byla 520 MPa.

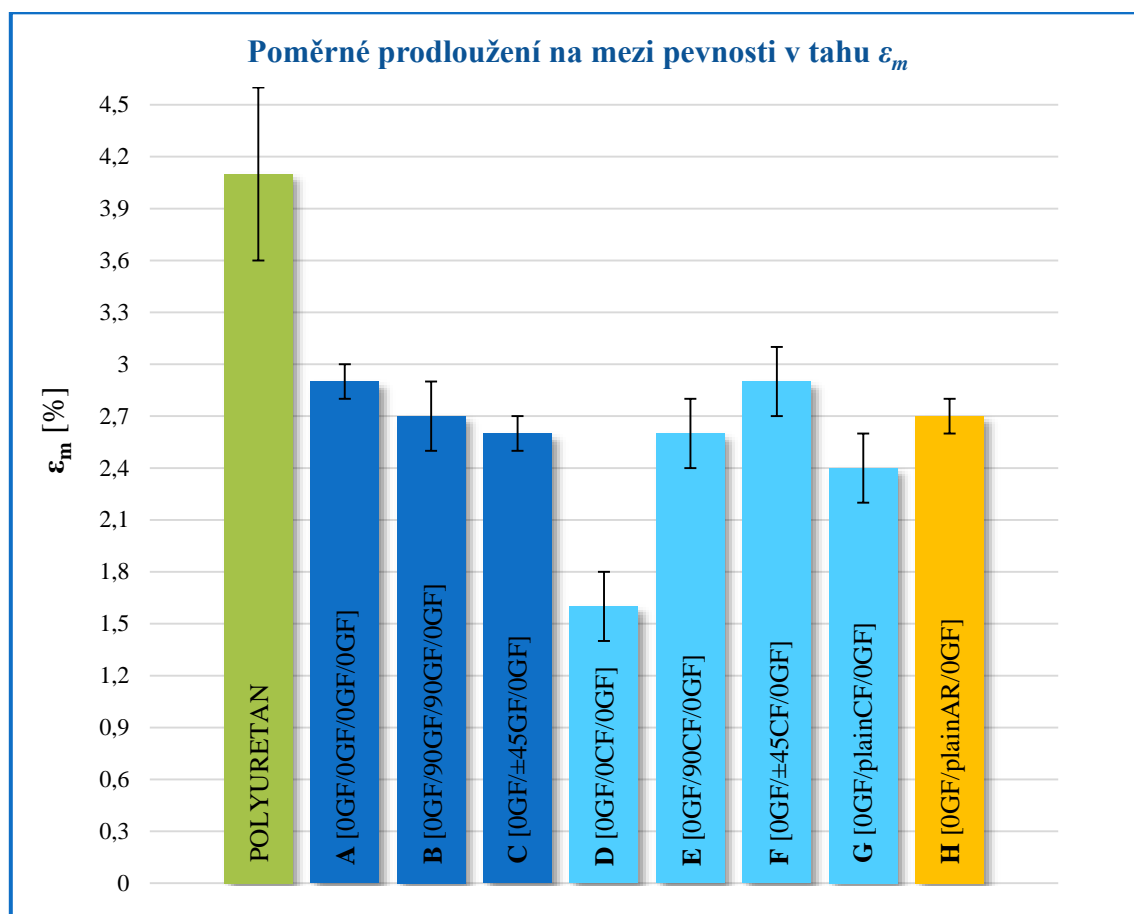
Z hlediska orientace jednosměrných vláken ve vrstvách kompozitu bude dosaženo nejvyšší pevnosti v tahu u případu, kdy zatížení působí ve směru vláken. To byla situace kompozitů „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] a „D“ [0GF/0CF/0GF], kde byla všechna vlákna orientována ve směru zatížení. Vlákna kompozitního systému jsou schopna přenášet nejvyšší zatížení v axiálním směru a tím tedy využít svých maximálních vlastností.

Naopak nejhorších hodnot dosáhne struktura, kde jsou vlákna zatěžována příčně. V tomto případě to byly kompozity „B“ [0GF/90GF/90GF/0GF] a „E“ [0GF/90CF/0GF], u kterých byly hodnoty mezi sebou srovnatelné. Oproti strukturám s orientací 0/0/0/0 zde nastal pokles meze pevnosti o 50 % pro samotná skelná vlákna a o 40 % pro kombinaci skelných a uhlíkových vláken. Při zatěžování kompozitu kolmo na směr vláken dochází k porušení matrice a její soudržnosti na mezifázovém rozhraní.

Podobně nízké meze pevnosti nabývaly struktury s biaxiální orientací ($\pm 45^\circ$) vláken v prostřední vrstvě kompozitu. Jednalo se o struktury „C“ [0GF/ ± 45 GF/0GF] a „F“ [0GF/ ± 45 CF/0GF].

Nejvyšší mez pevnosti měl hybridní kompozit „G“ [0GF/plainCF/0GF] (oproti kompozitu „H“), kde střední vrstva byla uhlíková tkanina typu plátno. Zde je však důležité zohlednit, že struktura „G“ měla nejnížší plošnou hmotnost textilní výztuže a tím i nejnížší hmotnostní podíl vláken. Ve výsledku obsahoval kompozit větší podíl polyuretanové matrice.

4.1.2 Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu

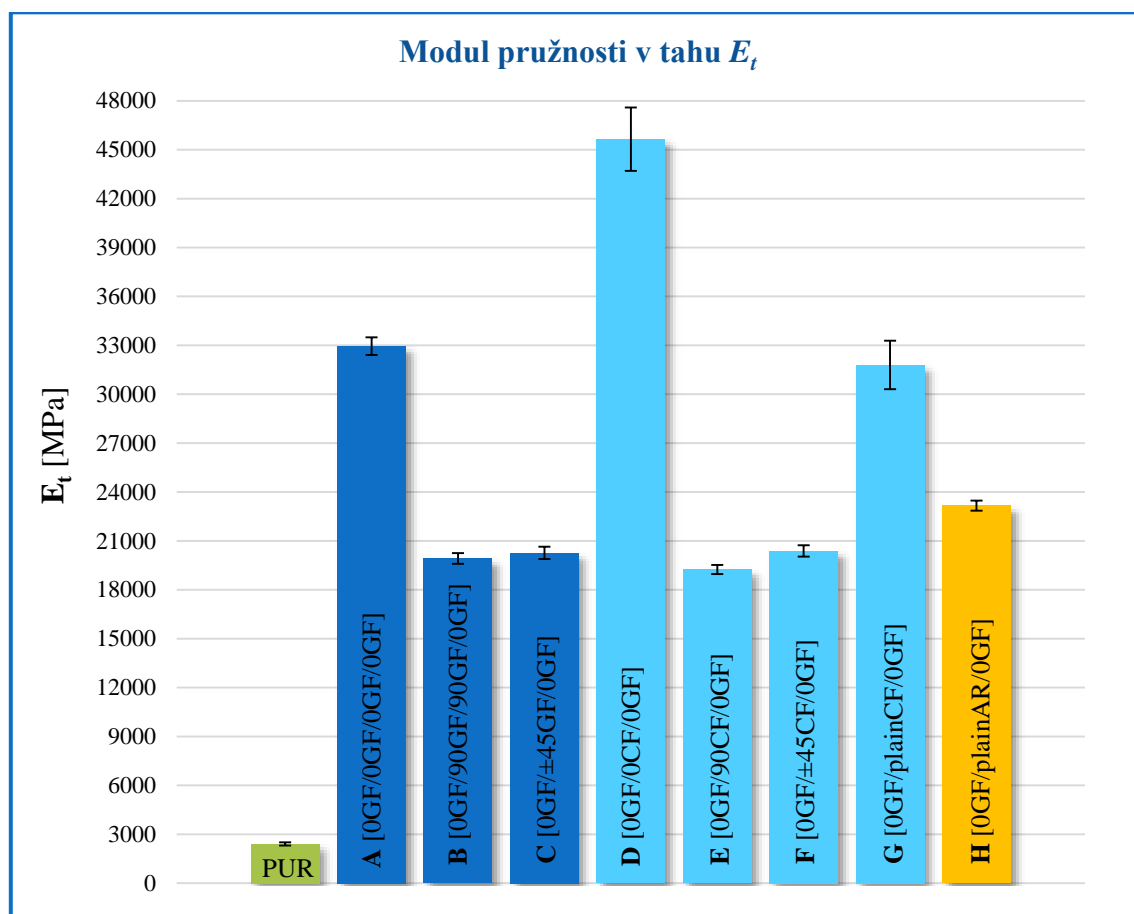


Obr. 50: Graf poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu

Kompozity s orientací vláken ve směru zatížení (varianty 0/0/0/0), kde se projevuje značné vyztužení matrice, je poměrné prodloužení dáno tažností vláken. V případě samotných skelných vláken u kompozitu „A“ bylo poměrné prodloužení na mezi pevnosti 2,9 %, kdežto u kombinace sklo-uhlík (kompozit „D“) došlo ke snížení o 45 %. Tažnost aramidových vláken se pohybuje mezi hodnotami tažnosti skelných a uhlíkových vláken. Kompozit „H“ obsahující střední vrstvu z aramidu měl poměrné prodloužení na mezi pevnosti 2,7 %.

Důsledkem rozdílné orientace pouze střední vrstvy vláken, kde krycí vrstvy jsou vždy kontinuální skelná vlákna ve směru 0°, jsou rozdíly hodnot malé, v řádu směrodatných odchylek. To je případ struktury „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] a „E“ [0GF/90CF/0GF], kde je rozdíl nepatrný.

4.1.3 Modul pružnosti v tahu



Obr. 51: Graf modulu pružnosti v tahu

Grafické znázornění hodnot modulu pružnosti E_t je na obr. 51. Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti bylo dosaženo u kompozitu „D“ [0GF/0CF/0GF], obsahující střední vrstvu z uhlíkových vláken, která mu dodávala značnou tuhost. Tato struktura dosáhla hodnoty modulu pružnosti v tahu 45650 MPa. Kompozit se svou vysokou tuhostí výrazně lišil od složení pouze ze skelných vláken, kde hodnota pro stejnou orientaci klesla o 28 %. Složení sklo-aramid („H“) mělo průměrný modul pružnosti 23168 MPa, ale díky malé adhezi polyuretanu k aramidovým vláknům není tato kombinace příliš vhodná.

Nejvyšší tuhost, resp. modul pružnosti v tahu bude mít kompozit s orientací vláken ve směru zatížení (0/0/0/0). To byly případy kompozitů „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] a „D“ [0GF/0CF/0GF]. Naopak nejnižší hodnoty modulu pružnosti v tahu budou mít struktury s orientací vláken kolmo na směr zatížení. S touto orientací se jednalo o kompozity „B“ [0GF/90GF/90GF/0GF] a „E“ [0GF/90CF/0GF], jejichž tuhost byla srovnatelná. Tento výrazný pokles je způsoben tím, že vlákna vložená kolmo na směr zatěžování kompozit nevyztužují, ale snižují tuhost samotné matrice.

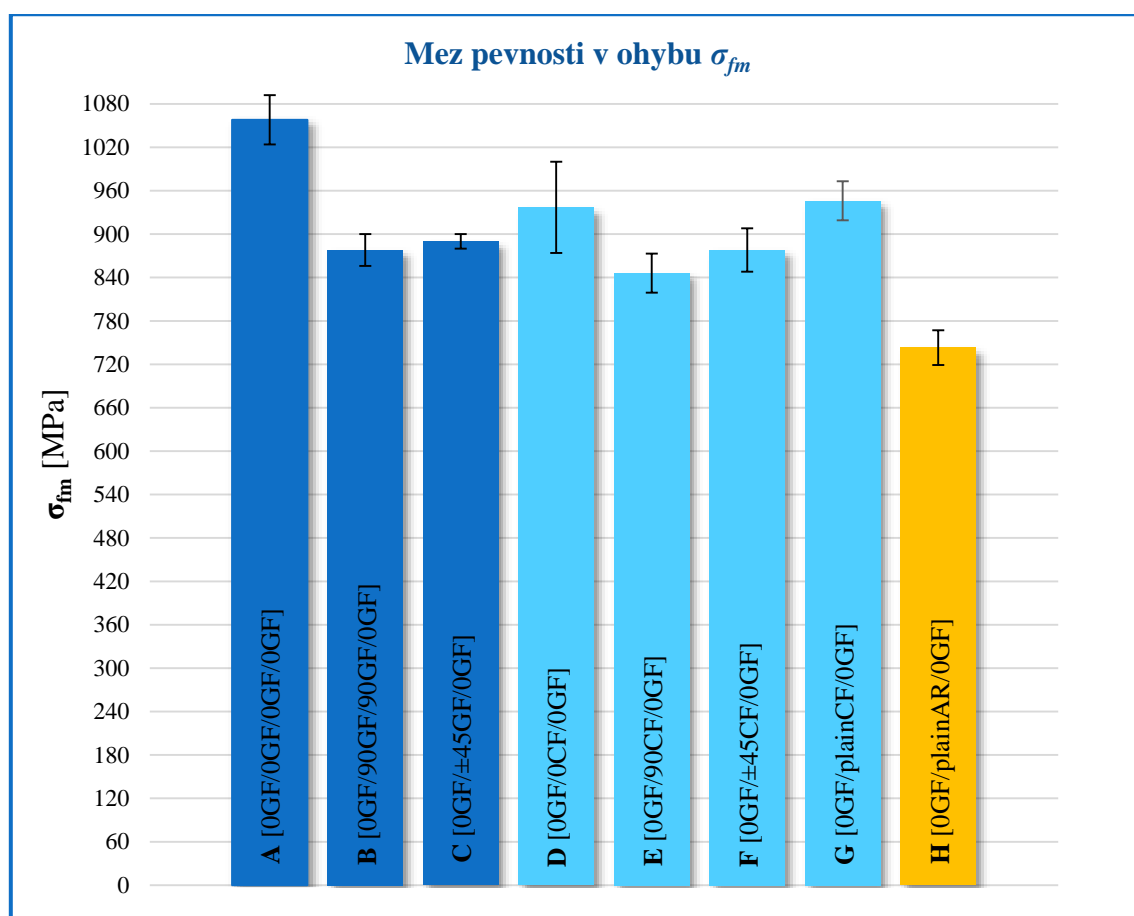
Nepatrný nárůst modulu pružnosti v tahu (o 2 %) vykazovaly kompozity s biaxiálními vlákny ($\pm 45^\circ$) ve střední vrstvě, jednalo se o materiál „C“ a „F“.

Velice dobré tuhosti dosahovala kombinace skelných vláken s uhlíkovou tkaninou typu plátno. Modul pružnosti v tahu byl 31797 MPa, při nejnižší plošné hmotnosti vláken v kompozitním systému.

4.2 Ohybové vlastnosti

Zkouška ohybem byla provedena dle normy ASTM D 790 – 03. Výsledkem byly hodnoty meze pevnosti v ohybu σ_{fm} , a modulu pružnosti v ohybu E_f .

4.2.1 Mez pevnosti v ohybu



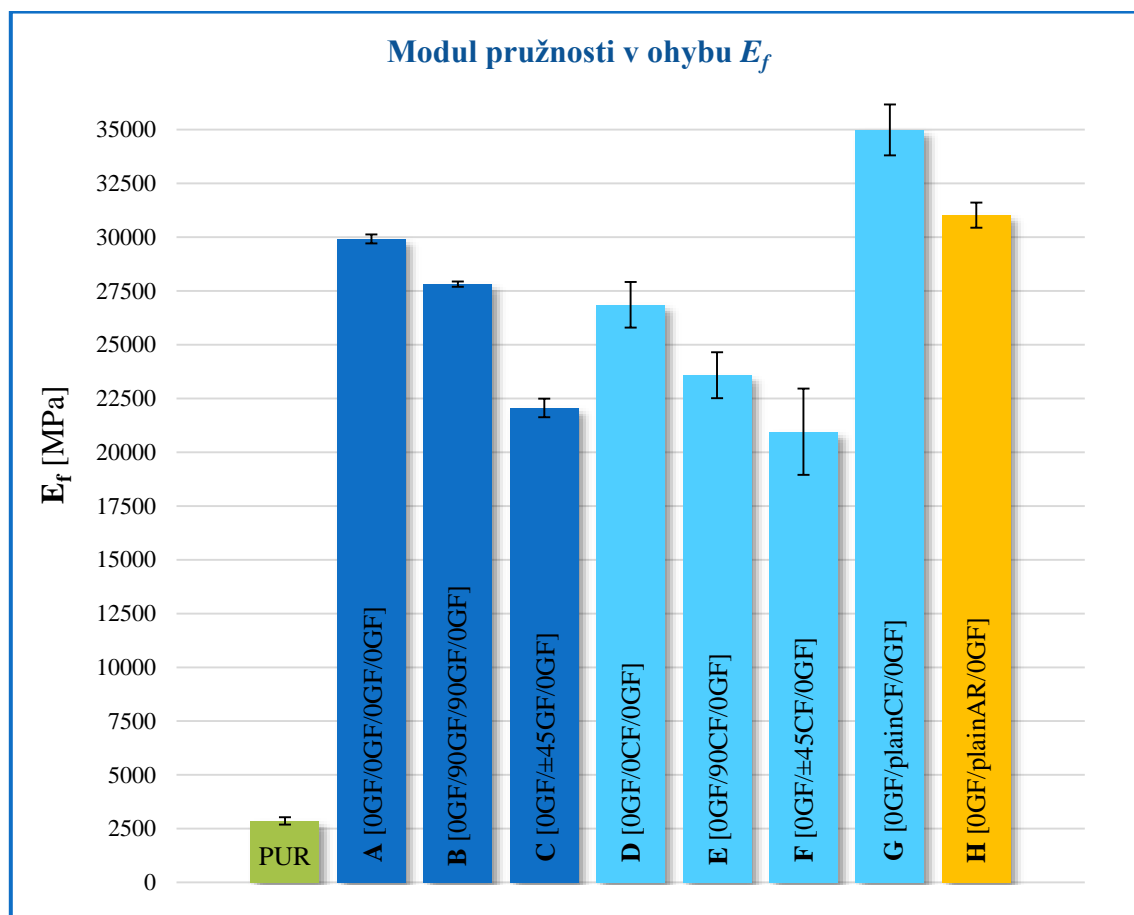
Obr. 52: Graf meze pevnosti v ohybu

Na obr. 52 je grafické znázornění meze pevnosti pro vybrané kompozitní materiály. Nejvyšší meze pevnosti z hlediska materiálu dosáhla struktura „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] s hodnotou $\sigma_{fm} = 1058$ MPa. U hybridního kompozitu sklo-uhlík (při stejné orientaci vláken) nastal propad meze pevnosti o 11 %. Nejnižších hodnot dosahovala kombinace sklo-aramid, kde mez pevnosti byla 743 MPa. Je to dáno tím, že nejvyšší zatížení přenáší horní vrstva (namáhání tlakem) a spodní vrstva (namáhání tahem), které byly tvořeny skelnými vlákny. Důsledkem špatné adheze matrice k aramidu a jeho vysoké

houževnatosti, došlo k porušení struktury při nižším zatížení, resp. při porušení krycích skelných vrstev.

Ve vzorku působí tlaková a tahová napětí, kterým nejlépe odolávají vlákna ve směru zatížení. To je případ kompozitu „A“ a „D“. Přičemž výborné meze pevnosti v ohybu dosahovala struktura „G“ [0GF/plainCF/0GF] s hodnotou $\sigma_{fm} = 946$ MPa. Pro námáhání ohybem je nepříznivé, když jsou vlákna zatěžována kolmo. Tyto struktury vykazovaly také nejmenší hodnoty meze pevnosti v ohybu. Konkrétně struktura „B“ [0GF/90GF/90GF/0GF] měla mez pevnosti v ohybu 878 MPa a hybridní kompozit „E“ [0GF/90CF/0GF] pouze 846 MPa. U biaxiálních vláken v kompozitech „C“ a „F“ nastal pouze nepatrný nárůst.

4.2.2 Modul pružnosti v ohybu



Obr. 53: Graf modulu pružnosti v ohybu

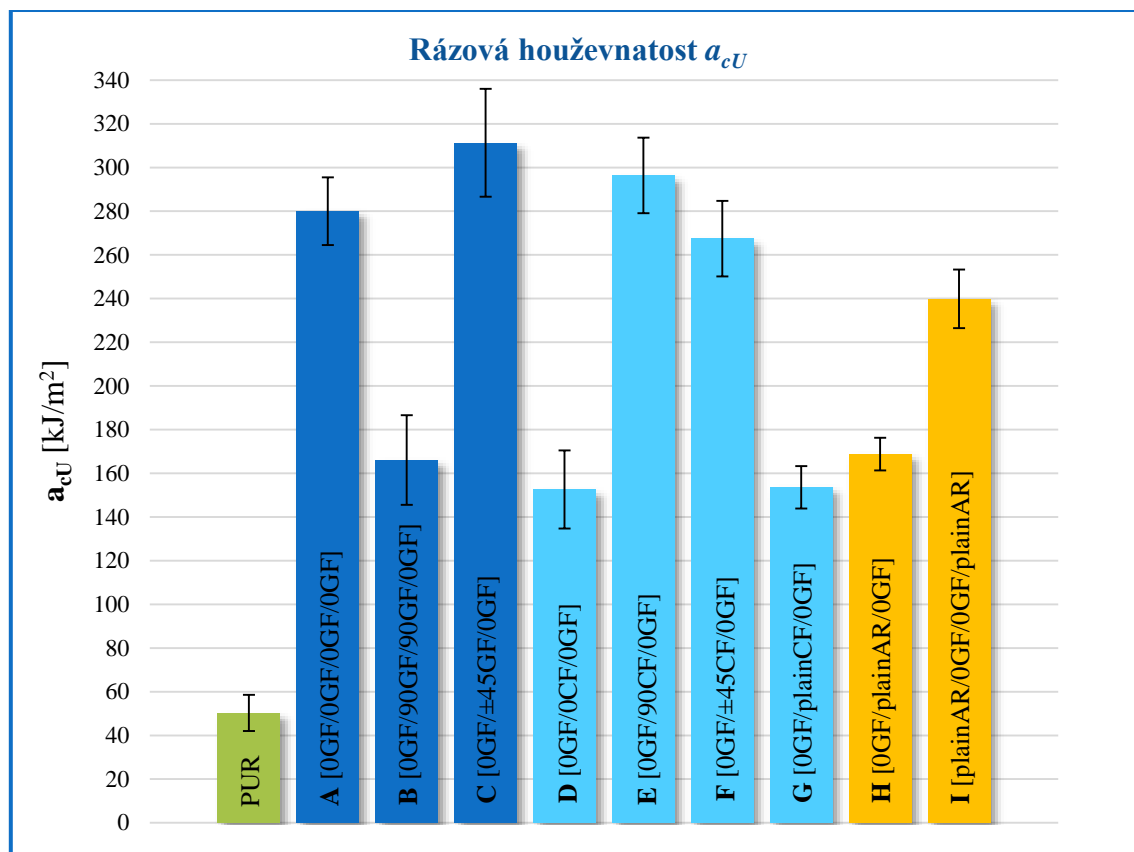
Grafické znázornění modulu pružnosti v ohybu je na obr. 53. Z hlediska materiálu vykazovaly kompozity složené pouze ze skelných vláken vyšší tuhost, než uhlíková vlákna. Nejvyšší modul pružnosti měl kompozit „G“, s hodnotou 34988 MPa. Vysoká hodnota modulu pružnosti v ohybu ($E_f = 31026$ MPa) u struktury „H“ [0GF/plainAR/0GF] byla dána především skelnými vlákny v krycích vrstvách.

Je to způsobeno tím, že modul pružnosti v ohybu se vyhodnocuje ve spodní části deformační křivky (při deformacích 0,05 % a 0,25 %). Při takto malých deformacích jsou zatíženy hlavně krajní vrstvy kompozitu. Adheze matrice k aramidu byla tak nízká, že po porušení krycích skelných vrstev je bylo možné lehce odtrhnout. U samotných skelných vláken struktury „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] byla hodnota modulu pružnosti v ohybu 29917 MPa. U hybridního kompozitu „D“ sklo-uhlík (při stejné orientaci) nastal pokles o 10 %.

Z hlediska orientace mají na modul pružnosti v ohybu nejvyšší vliv krajní vrstvy kompozitu, protože při malých deformacích přenášejí většinu zatížení. Vliv orientace střední vrstvy není tak zásadní. Pokles hodnoty modulu pružnosti byl mezi kompozitem „B“ [0GF/90GF/90GF/0GF] a „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] pouze 7 %. Mezi kompozity „D“ [0GF/0CF/0GF] a „E“ [0GF/90CF/0GF] byl rozdíl 12 %. Značnější propad nastal u biaxiální orientace vláken střední vrstvy ($\pm 45^\circ$). Mezi strukturami „A“ a „C“ byl rozdíl 26 % a mezi „D“ a „F“ 22 %.

4.3 Rázové vlastnosti

Rázová zkouška (metoda Charpy) byla provedena dle normy ISO 179-1. Výsledkem byla hodnota rázové houževnatosti a_{cU} .



Obr. 54: Graf rázové houževnatosti

Grafické znázornění hodnot rázové houževnatosti a_{cU} je na obr. 54. Kompozity složené z aramidu, který má extrémní houževnatost, nebylo možné úplně přerazit. To nastalo v případě struktury „I“ [plainAR/0GF/0GF/plainAR], kdy došlo k provlečení zkušebního vzorku mezi podpěrami. Hodnotu rázové houževnatosti 240 kJ/m^2 je nutno tedy brát pouze orientačně. U druhé varianty kompozitu s aramidovými vlákny, tedy „H“ [0GF/plainAR/0GF] došlo k porušení krycích skelných vrstev a rázová houževnatost byla 169 kJ/m^2 . Zhlediska velmi špatné adheze polyuretanu k aramidu nejsou tyto kombinace vhodné.

Zásadní vliv měla orientace vláken a jejich materiál. Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti ($a_{cU} = 311 \text{ kJ/m}^2$) dosáhla struktura „C“ [0GF/ ± 45 GF/0GF], u hybridního kompozitu „F“ [0GF/ ± 45 CF/0GF] došlo k poklesu o 14 %. Z kompozitů složených pouze ze skelných vláken měla nejhorší vlastnosti struktura „B“ [0GF/90GF/90GF/0GF] s rázovou houževnatostí 166 kJ/m^2 . Naproti tomu kombinace sklo-uhlík při stejné orientaci, kompozit „E“, vykazoval nárůst o 44 %. Tento rozdíl je dán tím, že uhlíková vlákna mají při orientaci ve směru rázu výraznější odolnost proti rázovému namáhání. Pro případ orientace vláken ve směru 0/0/0/0, byla rázová houževnatost materiálu „A“ (pouze skelná vlákna) o 46 % větší oproti hybridnímu kompozitu „D“ (sklo-uhlík). Značný pokles bude způsoben menším podílem vláken ve struktuře „D“, tedy menším vyztužením kompozitu (oproti „A“).

Nejhorší vlastnosti měl kompozit „G“ [0GF/plainCF/0GF], jeho rázová houževnatost byla 154 kJ/m^2 . Byl to důsledek nejmenšího podílu vláken ve struktuře, tudíž značně menšího vyztužení.

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo stanovení mechanických vlastností vybraných hybridních kompozitů (sklo-uhlík, sklo-aramid) vyrobených technologií HP-RTM. Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. V teoretické části je zpracována rešerše zaměřená na dlouhvláknové kompozity s polymerní matricí. Zejména reaktoplastové matrice, skelná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová vlákna a technologii RTM s jejími variantami.

Náplní experimentální části byla výroba kompozitních dílů (desek) technologií HP-RTM ve spolupráci s firmou Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. Kompozitní desky se skládaly ze 4, respektive 3 vrstev textilní výztuže v závislosti na plošné hmotnosti dané textilie. Vrchní a spodní vrstva kompozitního systému byla tvořena vždy kontinuálními skelnými vlákny v orientaci 0° . Výjimkou byl kompozit „I“, kde byly tyto vrstvy tvořeny aramidovou tkaninou s plátňovou vazbou. Jednotlivé struktury se lišily střední vrstvou, která byla tvořena skelnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny. Dále orientací vláken (0° , $\pm 45^\circ$ a 90°) a druhem textilie (kontinuální vlákna, tkanina typu plátno). Matricí kompozitního systému byl polyuretan. Z hotových desek byly pomocí vodního paprsku vyřezány zkušební vzorky dle příslušných norem pro zkoušky: tahem, ohybem, rázem. Měření proběhlo v laboratořích Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

V prvním měření se zjišťovaly tahové vlastnosti, konkrétně: mez pevnosti v tahu σ_m , poměrné prodloužení na mez pevnosti v tahu ε_m a modul pružnosti v tahu E_t . Nejlepší hodnoty meze pevnosti dosahovala struktura „G“ [0GF/plainCF/0GF] ($\sigma_m = 923$ MPa). Tento materiál měl zároveň nejnižší plošnou hmotnost vláknové výztuže (1600 g/m²). Oproti systému složenému pouze ze skelných vláken („A“), jehož celková plošná hmotnost činila 2400 g/m² a mez pevnosti byla v rozsahu odchylky srovnatelná. Z hlediska modulu pružnosti byly materiály též srovnatelné. Naopak výrazně vysoké tuhosti dosáhla varianta „D“ [0GF/0CF/0GF], modul pružnosti byl 45650 MPa, ale mez pevnosti v tahu byla nízká ($\sigma_m = 767$ MPa). Celková plošná hmotnost této struktury činila 1800 g/m².

Druhé měření mělo za úkol zjistit ohybové vlastnosti, konkrétně: mez pevnosti v ohybu σ_{fm} a modul pružnosti v ohybu E_f . Vysoké pevnosti v ohybu dosáhl kompozit „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF] ($\sigma_{fm} = 1058$ MPa), jehož orientace vláken na směr zatížení byla nejpříznivější. Nejvýhodnější struktura „G“ [0GF/plainCF/0GF] byla po stránce pevnosti v ohybu nižší ($\sigma_{fm} = 946$ MPa), ale její modul pružnosti v ohybu ($E_f = 34988$ MPa) výrazně převyšoval všechny ostatní. Zároveň měla struktura „G“ oproti „A“ plošnou hmotnost textilní výztuže o 800 g/m^2 nižší.

V třetím měření byla zjišťována rázová houževnatost a_{cU} . Nejvyšší rázovou houževnatost měl kompozit „C“ [0GF/±45GF/0GF], $a_{cU} = 311 \text{ kJ/m}^2$. Za ním nejvyšší odolnost rázovému namáhání vykazovala struktura „E“ [0GF/90CF/0GF], která ovšem díky orientaci střední vrstvy není příznivá pro jiný druh namáhání. Dobré vlastnosti měl i kompozit „A“ [0GF/0GF/0GF/0GF], jehož plošná hmotnost vláken byla srovnatelná se strukturou „C“ a rázová houževnatost dosáhla hodnoty 280 kJ/m^2 . Kompozitní systémy obsahující aramidovou tkaninu s plátňovou vazbou, nedosahovaly vysokých hodnot. Důvodem mohla být špatná adheze polyuretanové matrice k aramidu a jeho špatné prosycení.

Ze souhrnu výsledků všech zkoušek dosahoval vysokých hodnot mechanických vlastností kompozit složený z kontinuálních skelných vláken v orientaci 0/0/0/0, tedy materiál „A“. Je důležité zohlednit i plošnou hmotnost textilní výztuže, která byla u této varianty 2400 g/m^2 , což je nejvíce ze všech struktur. Zároveň adheze skelných vláken k polyuretanové matici bude nejvyšší. Ovšem nejvýhodnější struktura pro svou nízkou plošnou hmotnost výztuže (1600 g/m^2) byla varianta „G“ [0GF/plainCF/0GF]. Při zkoušce tahem a ohybem dosahovala výborných vlastností, ale při rázové zkoušce důsledkem malého vyztužení, dopadla nejhůře.

Do dalšího výzkumu bych doporučoval, zaměřit se na hybridní strukturu složenou z kontinuálních skelných vláken a uhlíkové tkaniny. Výhodné by bylo použít uhlíkovou tkaninu o větší plošné hmotnosti. Aramidová tkanina díky vysoké koncentraci vláken nebyla tak dokonale prosycena a adheze k matici byla nízká. Pro další měření by bylo vhodné, využít např. kontinuálních aramidových vláken.

Seznam použité literatury

- [1] ROSICKÝ, Jiří a Josef KLEMENT. Ortopedická protetika. *Ortotikaprotetika* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1
- [3] Proč se šnečí ulita nerozbije?. *Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova* [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://static1.squarespace.com/static/5058927f24acf7cfaa552964/t/5074a446e4b01e64d21253a4/1349821514168/Hp.jpg?format=1000w>
- [4] VAŇKOVÁ, Monika. Vláknové kompozity. Jak se vyrábějí a kde najdeme jejich využití?. *Talentica* [online]. 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.talentica.cz/vlaknove-kompozity/>
- [5] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [6] ZIGLER, Martin. *Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s plnivý na bázi vodivých polymerů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14994410-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-technologie-a-mereni-diplomova-prace.html>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] *Protech Composites* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://cdn2.bigcommerce.com/server2700/72b8a/products/236/images/743/nomex_honeycomb_sandwich_panel__87002.1477612913.500.398.jpg?c=2
- [8] *Admatis: Sandwich structures* [online]. 2016 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.admatis.com/img/kompetenciak/material_science/rohacell_rotor.jpg
- [9] Fraunhofer IWU. *Railway-news* [online]. Chemnitz, Germany [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://railway-news.com/wp-content/uploads/2016/04/IMG_8898-2-1024x683.jpg
- [10] JEDINÁK, Petr. *Analýza mechanických vlastností kompozitů vyrobených technologií HP-RTM*. Liberec, 2017. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [11] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Liberec, 2016 [cit. 2018-04-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>

- [12] KNOB, Antonín. *Plazmochemické zpracování vláknových výztuží pro polymerní kompozity*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=50496
- [13] PŘIKRYL, Radek. *PLAZMOVÉ POLYMERY NA BÁZI KŘEMÍKU* [online]. Brno, 2003 [cit. 2018-04-23]. ISBN 80-214-2425-7. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2425-7.pdf>
- [14] Lenfeld, P. *Kompozity* PPT prezentace
- [15] *Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba*. Praha, 2007. Prezentace. ČVUT v Praze. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf
- [16] WAZIR, Huzaifa. Coconut fiber. *Textilelearner* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://3.bp.blogspot.com/-l6dS3VbYIzU/VXzmSanX1sI/AAAAAAAXgE/KJE0ylyBGo8/s1600/coconut-fiber.jpeg>
- [17] Bulk Fiber. *Unifrax* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://christyrefractories.com/wp-content/uploads/2015/05/Bulk-Fiber014.jpg>
- [18] Stainless Steel Fiber. *Newcore* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.newcore.net.in/wp-content/uploads/2017/09/Stainless-Steel-Fiber-or-Stainless-Steel-Fibre3.jpg>
- [19] S-glass fiber / roving. *Directindustry* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/50640-4390855.jpg
- [20] Základní princip výroby skleněných vláken. *BTTO* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.btto.cz/cs/zakladni-princip-vyroby-sklenenych-vlaken>
- [21] Carbon roving. *Cnrad* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/de/238066_BB_02_FB/image.jpg?x=1000&y=1000&ex=1000&ey=1000&align=center
- [22] KOS, Petr. *Vlastnosti polymerních dlouhovláknových kompozitů s různými výztužemi*. Praha. ČVUT. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf12/2540.pdf>
- [23] Aramid roving. *Shop1.r-g* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://ezentrumbilder4.de/rg/bilder/A71590.jpg>
- [24] CAMPBELL, F. C. *Structural composite materials*. 1st edition. USA: ASM International, 2010. 629 pages. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [25] Ruční laminace. *Plastic* [online]. Vlčkovice v Podkrkonoší [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace-cz

- [26] Ruční laminace. *Form* [online]. Horní Lideč [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/rucni-laminace>
- [27] Hand Lay-Up. *Nuplex* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.nuplex.com/composites/getmedia/443cb467-92a4-4af2-ab8f-7a67dc23249b/Process_handlayup?width=540&height=216
- [28] Spray Lay-Up. *Nptel* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture7/7_3.htm
- [29] Spray Lay-Up. *Nptel* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture7/images/figure2.jpg>
- [30] SMC. *Prefa-kompozity* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/gallery/smc/SMC-pl%C3%A1t.jpg>
- [31] SMC. *Prefa-kompozity* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/smc>
- [32] SMC. *Prefa-kompozity* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/gallery/smc/Sch%C3%A9ma-SMC-02-CZ.jpg>
- [33] BMC. *Prefa-kompozity* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/BMC/>
- [34] Bulk Molding Compound. *Allproducts* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.allproducts.com/plastic/enliang/05_bulk_molding_compound-l.jpg
- [35] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Liberec. 2016 [cit. 2018-04-24]. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [36] VAN LIESHOUT, Laurens. RTM Process. *Wikipedia* [online]. 2006 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/32/RTM_process.png/800px-RTM_process.png
- [37] KOŘÍNEK, Zdeněk. *L-RTM* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [38] L-RTM. *Moldedfiberglass* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.moldedfiberglass.com/sites/default/files/user/images/MFG_rtm-lite.jpg
- [39] GARDINER, Ginger. *The rise of HP-RTM* [online]. 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-rise-of-hp-rtm>
- [40] HP-RTM. *Katcon* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.katcon.com/advancedmaterials/wp-content/uploads/2015/04/thermoforming_process-1024x319.jpg

- [41] HP-RTM Press 200T. *Hennecke* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.langzauner.at/wp-content/uploads/2017/12/presse-hp-rtm-200ton.jpg>
- [42] QFOAM. *Hennecke* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.hennecke.com/sites/default/files/images/produktbilder/pu_meterin_g_machine_xl_p.jpg
- [43] Mixing head for high-pressure RTM. *Kraussmaffe* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.kraussmaffe.com/media/images/produktbilder/R-14-16-02-02-MK-10-2-RTM-500.png>
- [44] Technologie jejich popis a schémata. *Havel Composites* [online]. Svědlice, 2014 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [45] VARTM. *Demantic Scholar* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/VARTM-Variability-and-Substantiation-Heider/a3aab29cf4a49f3a5ea4919710235c7ee837a6dd/figure/146>
- [46] VARTM. *Fibrotek* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://www.fibrotek.com/public_upload/images/VARTM/thumbnails/VARTM2-scale_max-1000x800.jpg
- [47] Vacuum infusion process. *Altropol* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.altropol.de/wp-content/uploads/2016/07/Infusion_017.jpg
- [48] BLACK, Sara. SQRTM. *CompositesWorld* [online]. 2010 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts>
- [49] Autokláv. *Plastic* [online]. Vlčkovice v Podkrkonoší [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>
- [50] Pultruze. *Prefa-kompozity* [online]. Brno [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>
- [51] Pultruze. *Fibrolux* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://fibrolux.com/fileadmin/Bilder/pultrusion_process.png
- [52] Filament Winding. *Mikrosam* [online]. Prilep Macedonia [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.mikrosam.com.mk/filament/maw20fb4/sl/filament_3.jpg
- [53] Filament winding. *Nuplex* [online]. Botany Australia [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.nuplex.com/composites/NuplexComposites/media/Composites-Image-Library/Images%20-%20Processes/Filament-Winding-Process.jpg>

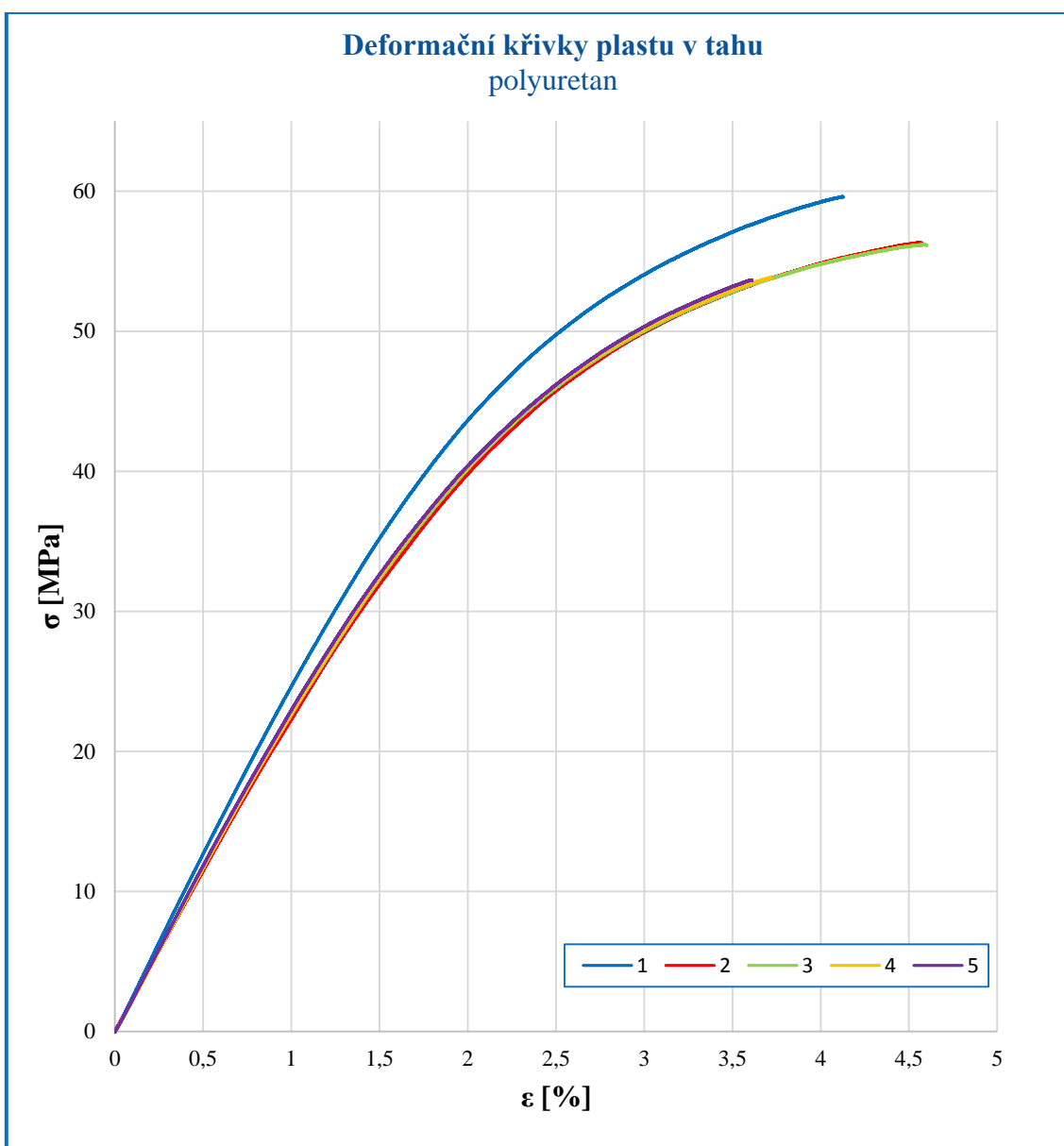
- [54] Tex (jednotka). *Wikipedia* [online]. 2018 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tex_\(jednotka\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tex_(jednotka))
- [55] Non-Crimp Fabrics. *Saertex* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.saertex.com/en/products/multiaxial-fabrics>
- [56] BĚHÁLEK, Luboš. *Mechanické a viskoelastické vlastnosti plastů* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz>. Přednáška. TU v Liberci.
- [57] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. 2011.
- [58] Technical Datasheet – Elastolit® R 8819/104/Lte
- [59] Technical Datasheet – SAERTEX SAP No. 20000353
- [60] Technical Datasheet – SAERTEX SAP No. 20006626
- [61] Technical Datasheet – SGL Group Udo UD CS 600/1266
- [62] Technical Datasheet – SELCOM CBXS600
- [63] Technical Datasheet – GRM Systems GG 400 P
- [64] Technical Datasheet – Teijin Twaron® T 750/2
- [65] Dosing unit for the plastics industry. *Directindustry* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/61208-2310909.jpg
- [66] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Naměřené tahové vlastnosti – polyuretan	I
Příloha č. 2: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/0GF/0GF/0GF].....	II
Příloha č. 3: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/90GF/90GF/0GF].....	III
Příloha č. 4: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/±45GF/0GF].....	IV
Příloha č. 5: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/0CF/0GF]	V
Příloha č. 6: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/90CF/0GF]	VI
Příloha č. 7: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/±45CF/0GF]	VII
Příloha č. 8: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/plainCF/0GF]	VIII
Příloha č. 9: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/plainAR/0GF]	IX
Příloha č. 10: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/0GF/0GF/0GF].....	X
Příloha č. 11: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/90GF/90GF/0GF].....	XI
Příloha č. 12: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/±45GF/0GF].....	XII
Příloha č. 13: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/0CF/0GF]	XIII
Příloha č. 14: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/90CF/0GF]	XIV
Příloha č. 15: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/±45CF/0GF]	XV
Příloha č. 16: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/plainCF/0GF]	XVI
Příloha č. 17: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/plainAR/0GF]	XVII
Příloha č. 18: Naměřené rázové vlastnosti (metoda Charpy)	XVIII

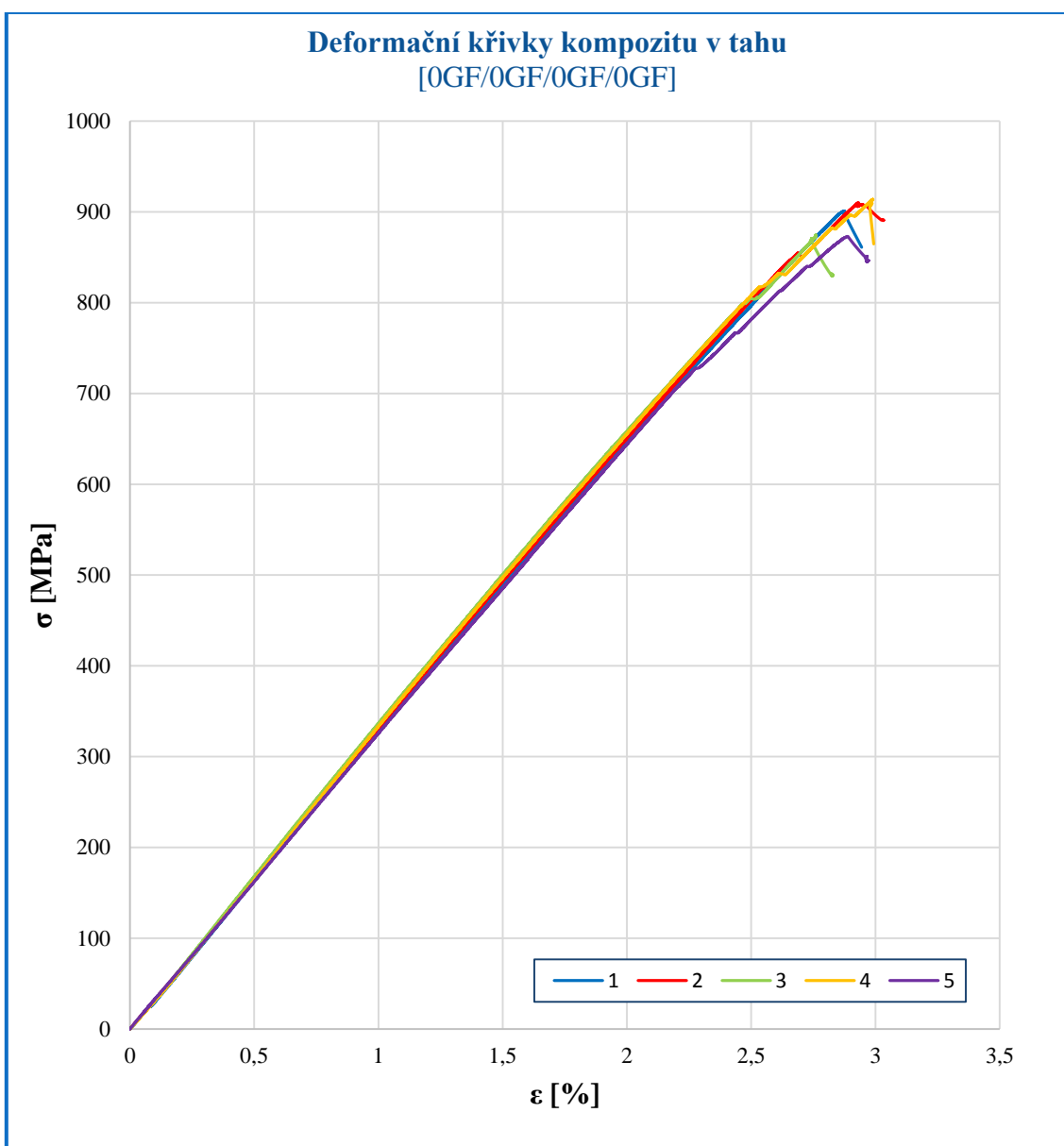
Příloha č. 1: Naměřené tahové vlastnosti – polyuretan

0	Polyuretan		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	60	4,1	2581
2	56	4,6	2329
3	56	4,6	2399
4	54	3,7	2374
5	54	3,6	2385
\bar{x}	56	4,1	2414
s	3	0,5	98



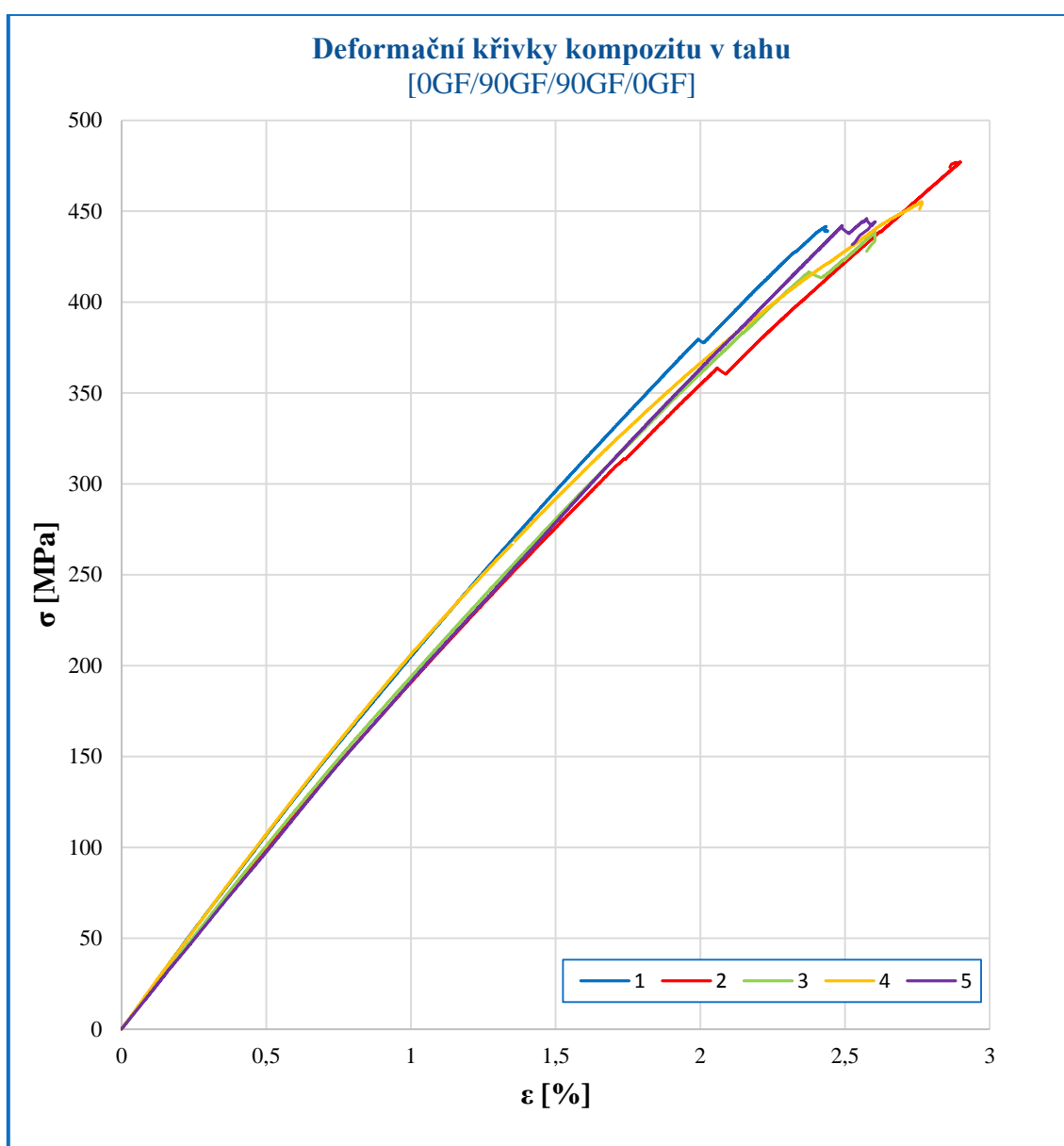
Příloha č. 2: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/0GF/0GF/0GF]

A	[0GF/0GF/0GF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	901	2,9	33112
2	910	2,9	32664
3	875	2,8	33750
4	914	3,0	32297
5	873	2,9	32918
\bar{x}	895	2,9	32948
s	20	0,1	542



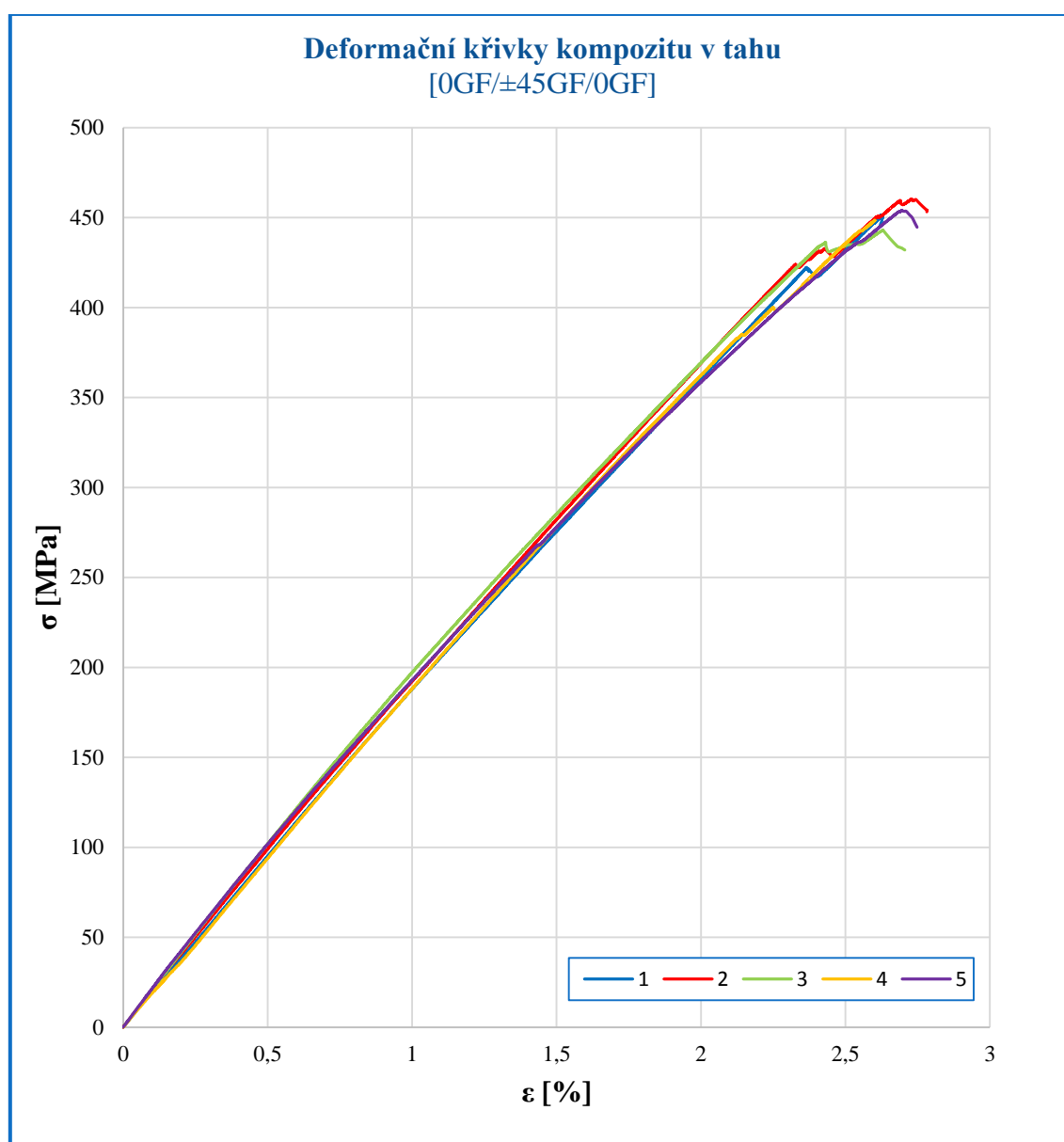
Příloha č. 3: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/90GF/90GF/0GF]

B	[0GF/90GF/90GF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	442	2,4	19740
2	477	2,9	20216
3	438	2,6	19746
4	455	2,8	20341
5	446	2,6	19595
\bar{x}	452	2,7	19928
s	16	0,2	329



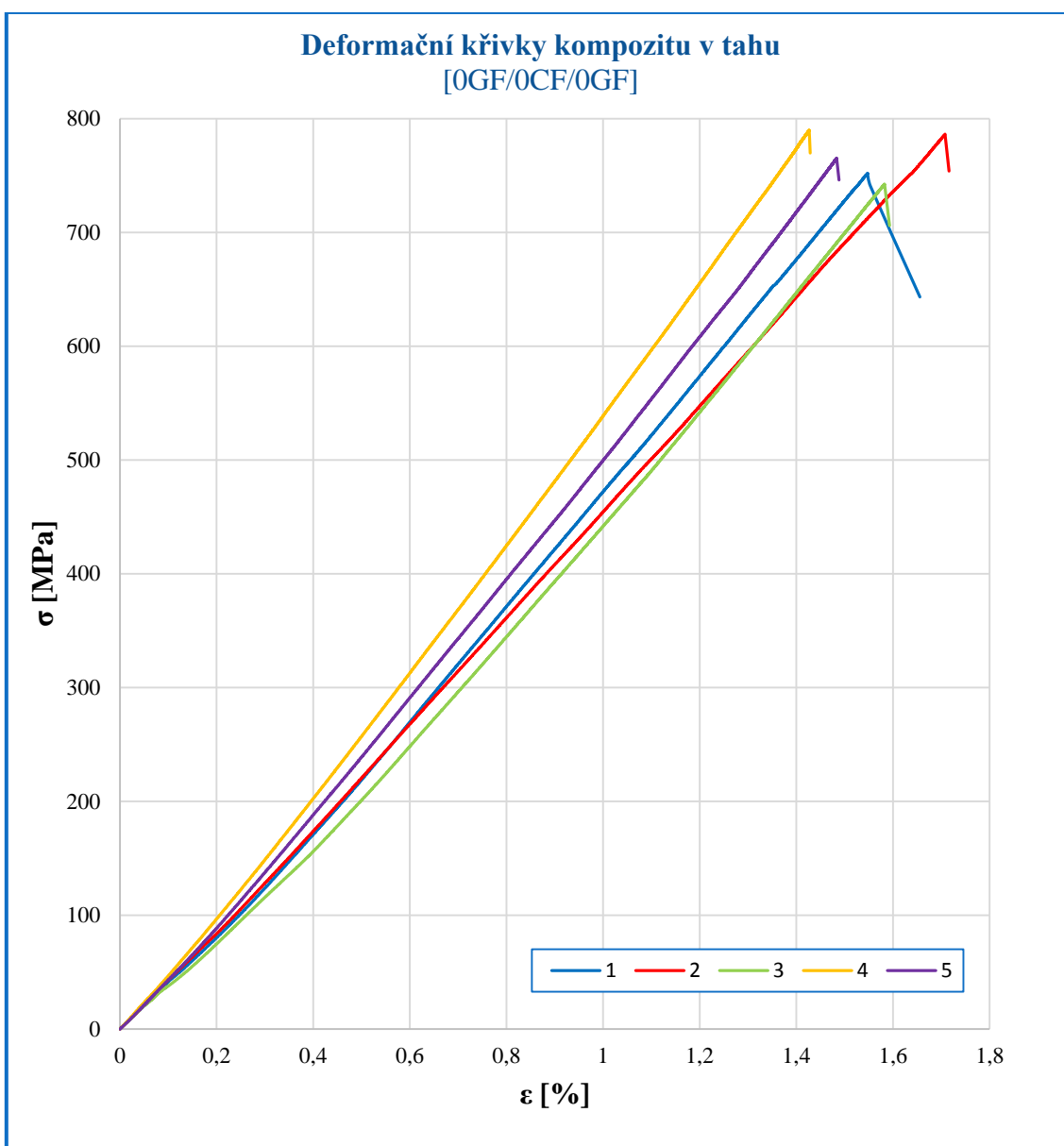
Příloha č. 4: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/±45GF/0GF]

C	[0GF/±45GF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	452	2,6	19652
2	460	2,7	20572
3	443	2,6	20512
4	449	2,6	20163
5	454	2,7	20441
\bar{x}	452	2,6	20268
s	7	0,1	378



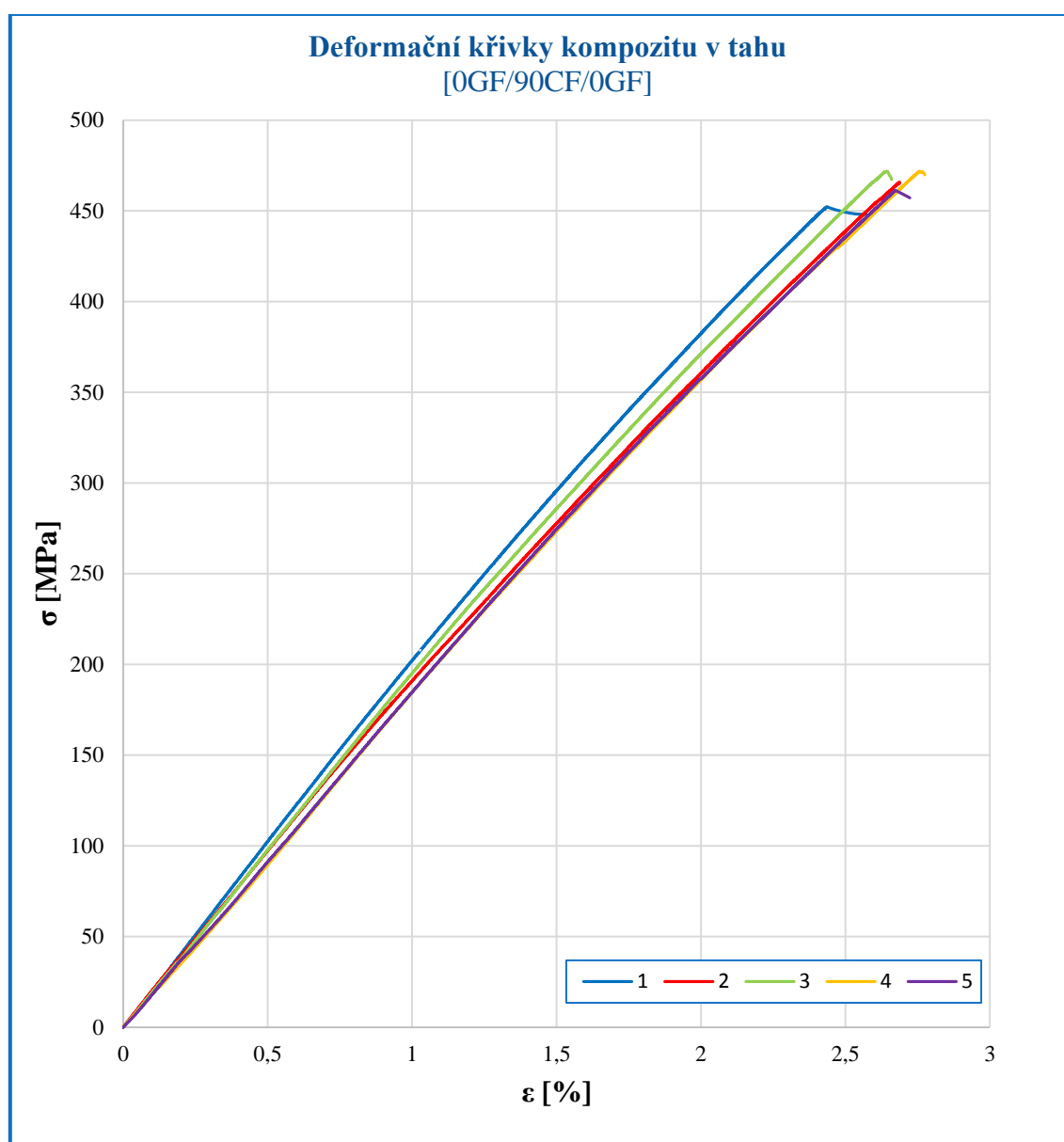
Příloha č. 5: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/0CF/0GF]

D	[0GF/0CF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	752	1,6	46045
2	786	1,7	42489
3	742	1,6	45309
4	790	1,4	47215
5	765	1,5	47191
\bar{x}	767	1,6	45650
s	21	0,2	1942



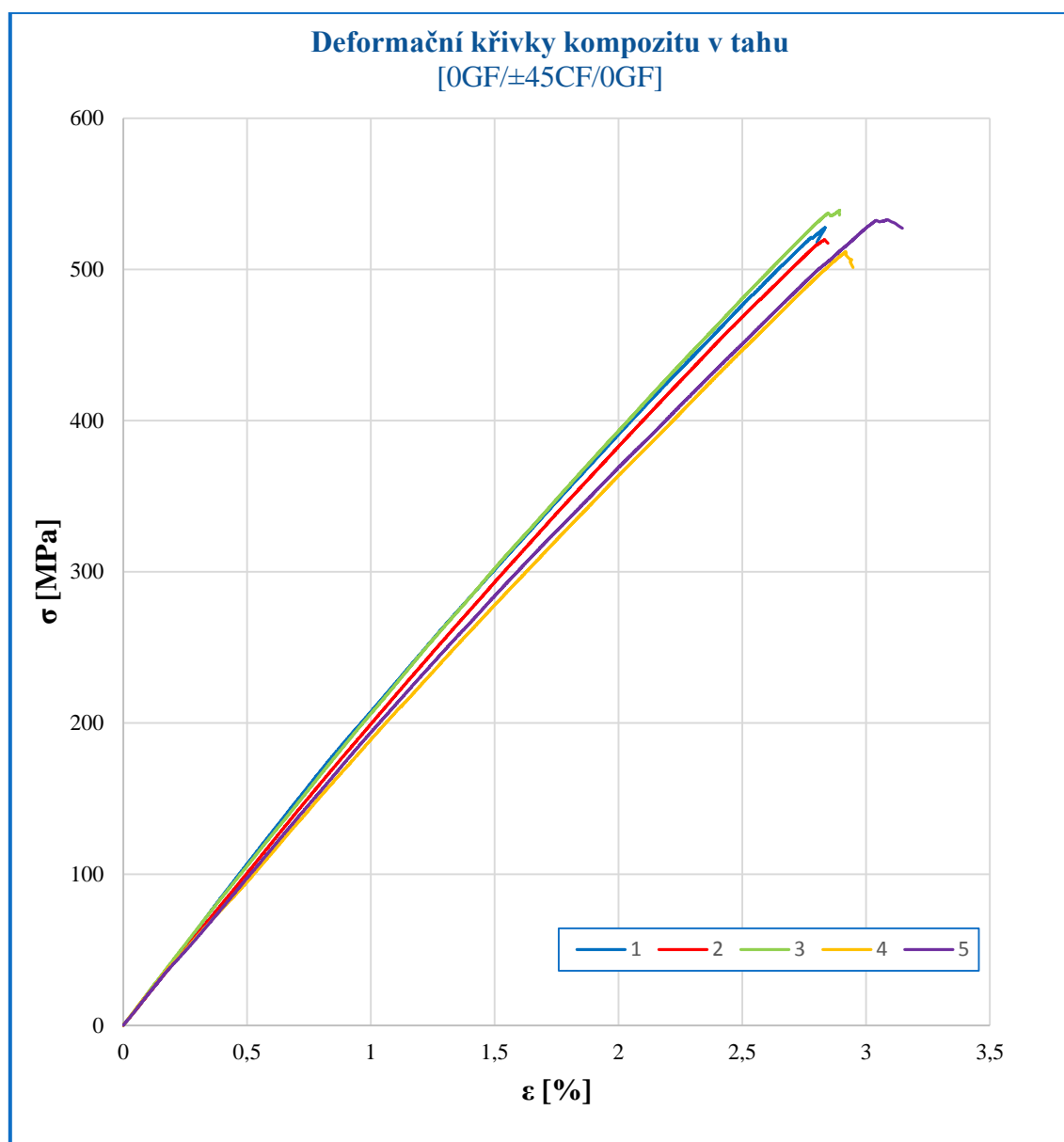
Příloha č. 6: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/90CF/0GF]

E	[0GF/90CF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	452	2,4	18850
2	466	2,7	19542
3	472	2,6	19114
4	472	2,8	19473
5	461	2,7	19278
\bar{x}	465	2,6	19251
s	9	0,2	280



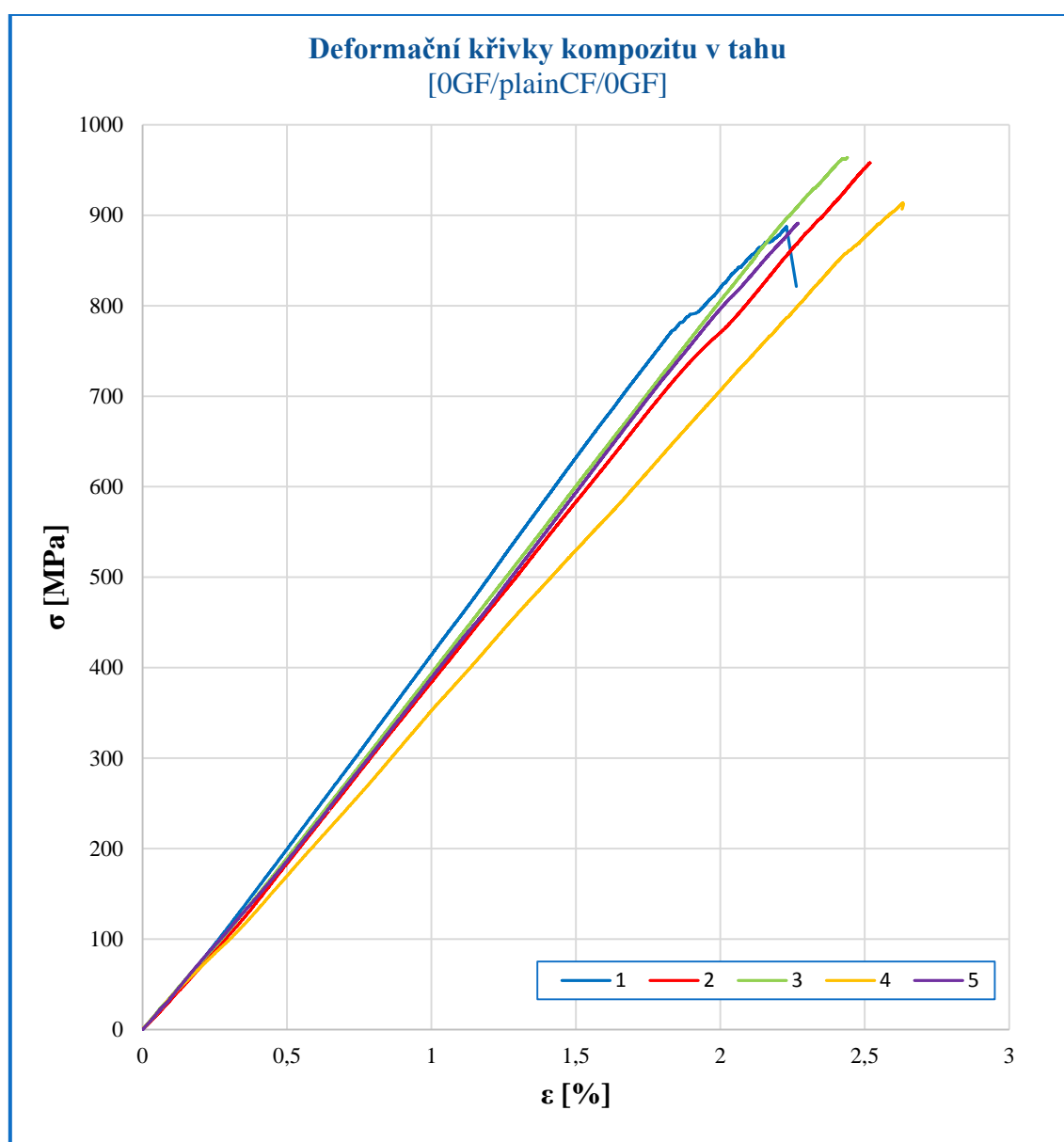
Příloha č. 7: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/±45CF/0GF]

F	[0GF/±45CF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	528	2,8	20733
2	520	2,8	20663
3	539	2,9	20102
4	512	2,9	19948
5	533	3,1	20491
\bar{x}	526	2,9	20387
s	11	0,2	347



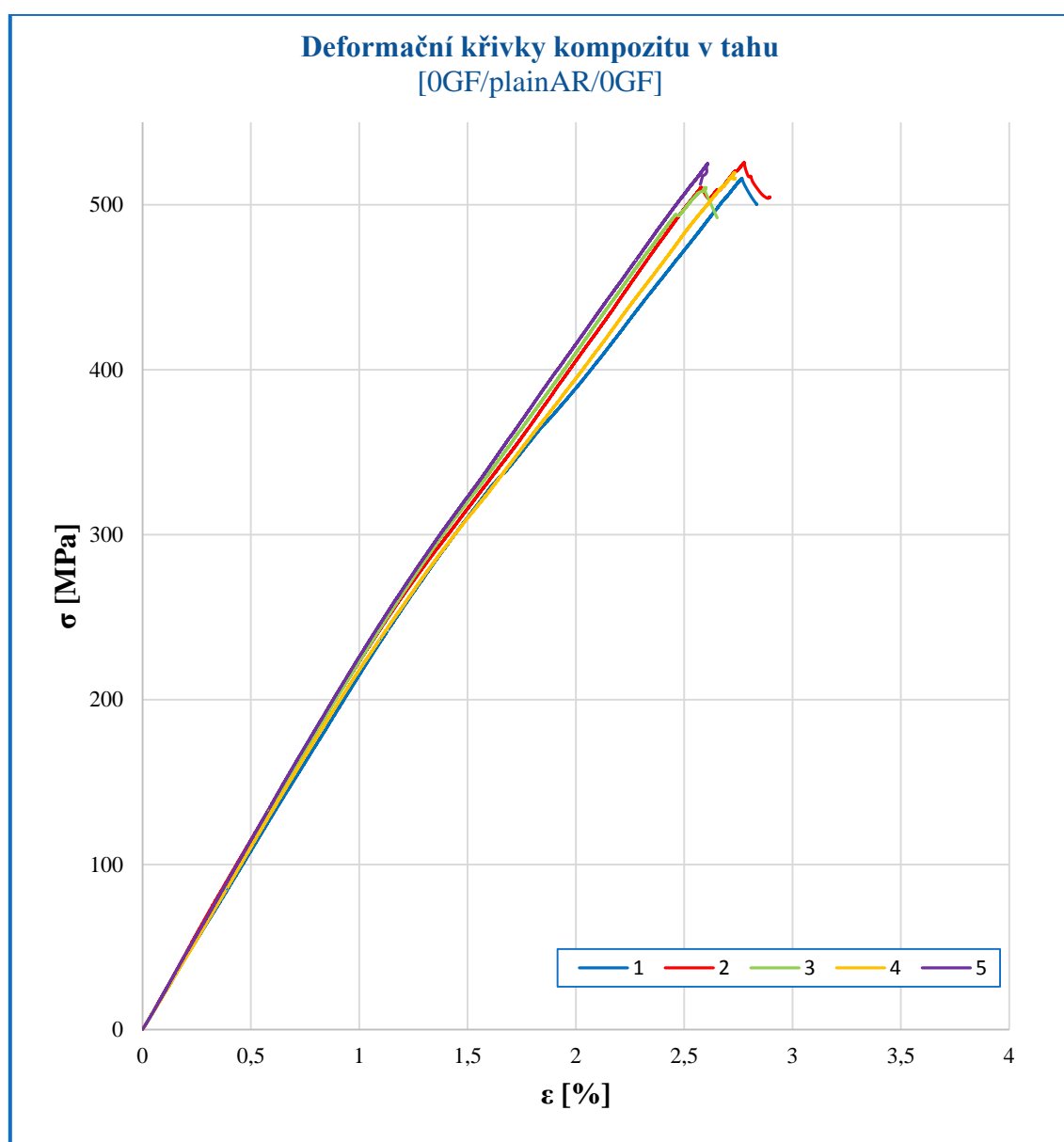
Příloha č. 8: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/plainCF/0GF]

G	[0GF/plainCF/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	888	2,2	31626
2	958	2,5	33593
3	964	2,4	29654
4	914	2,6	31397
5	891	2,3	32713
\bar{x}	923	2,4	31797
s	37	0,2	1488



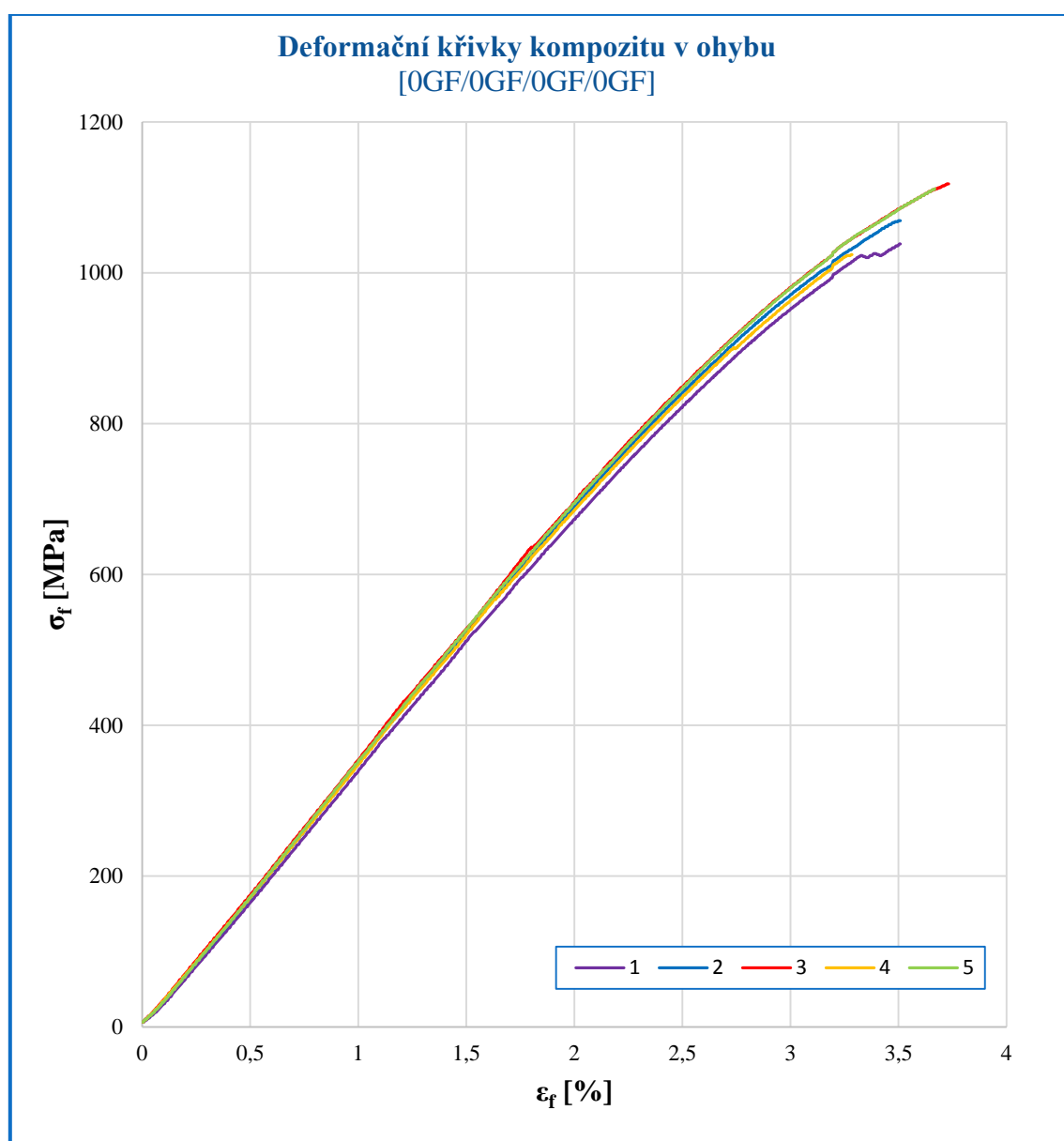
Příloha č. 9: Naměřené tahové vlastnosti – kompozit [0GF/plainAR/0GF]

H	[0GF/plainAR/0GF]		
zkouška	σ_m [MPa]	ε_m [%]	E_t [MPa]
1	516	2,8	22875
2	526	2,8	23271
3	511	2,6	23643
4	520	2,7	22932
5	525	2,6	23121
\bar{x}	520	2,7	23168
s	7	0,1	309



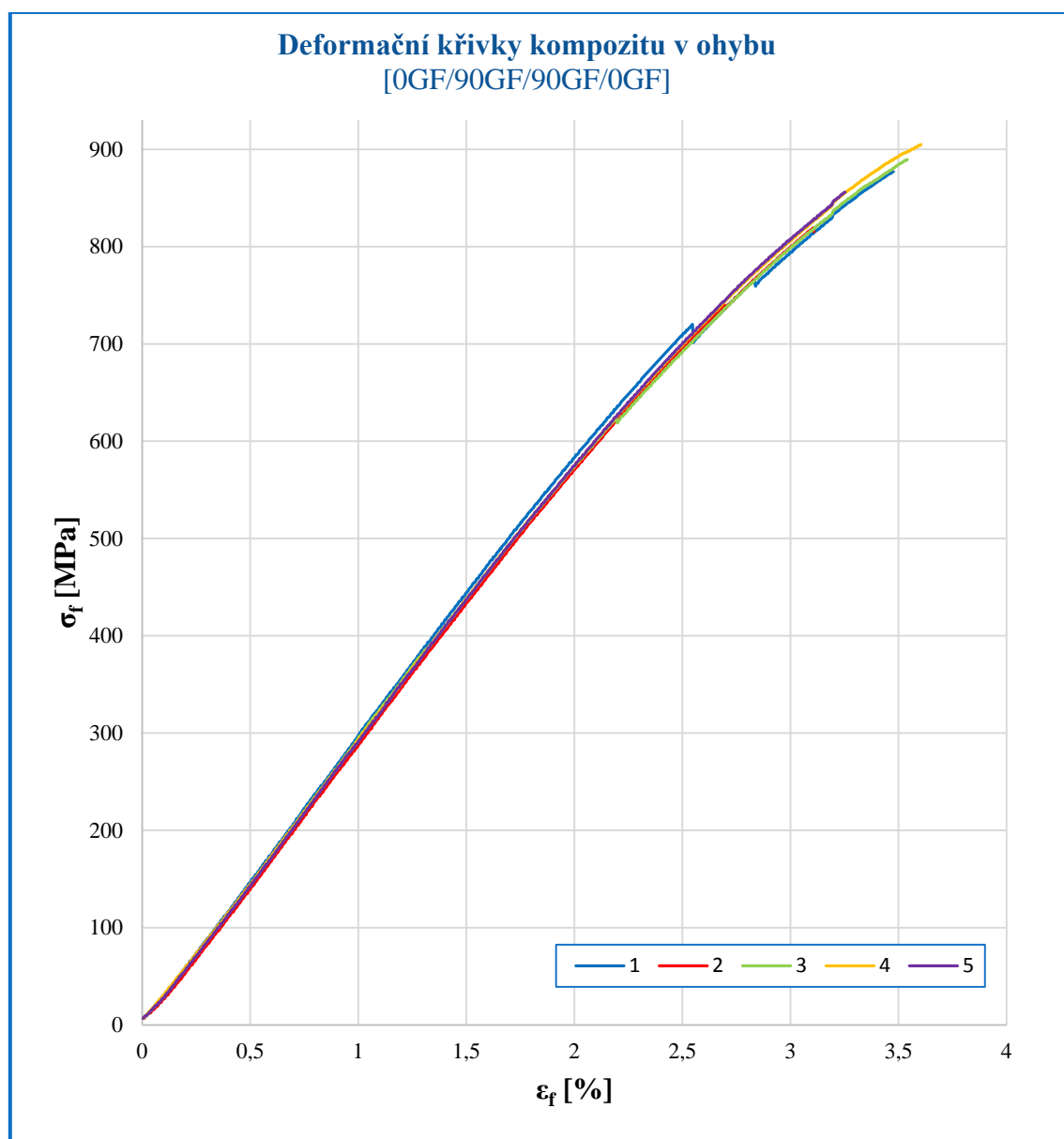
Příloha č. 10: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/0GF/0GF/0GF]

A	[0GF/0GF/0GF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	1039	29910
2	1042	30035
3	1109	30005
4	1025	30075
5	1075	29559
\bar{x}	1058	29917
s	34	209



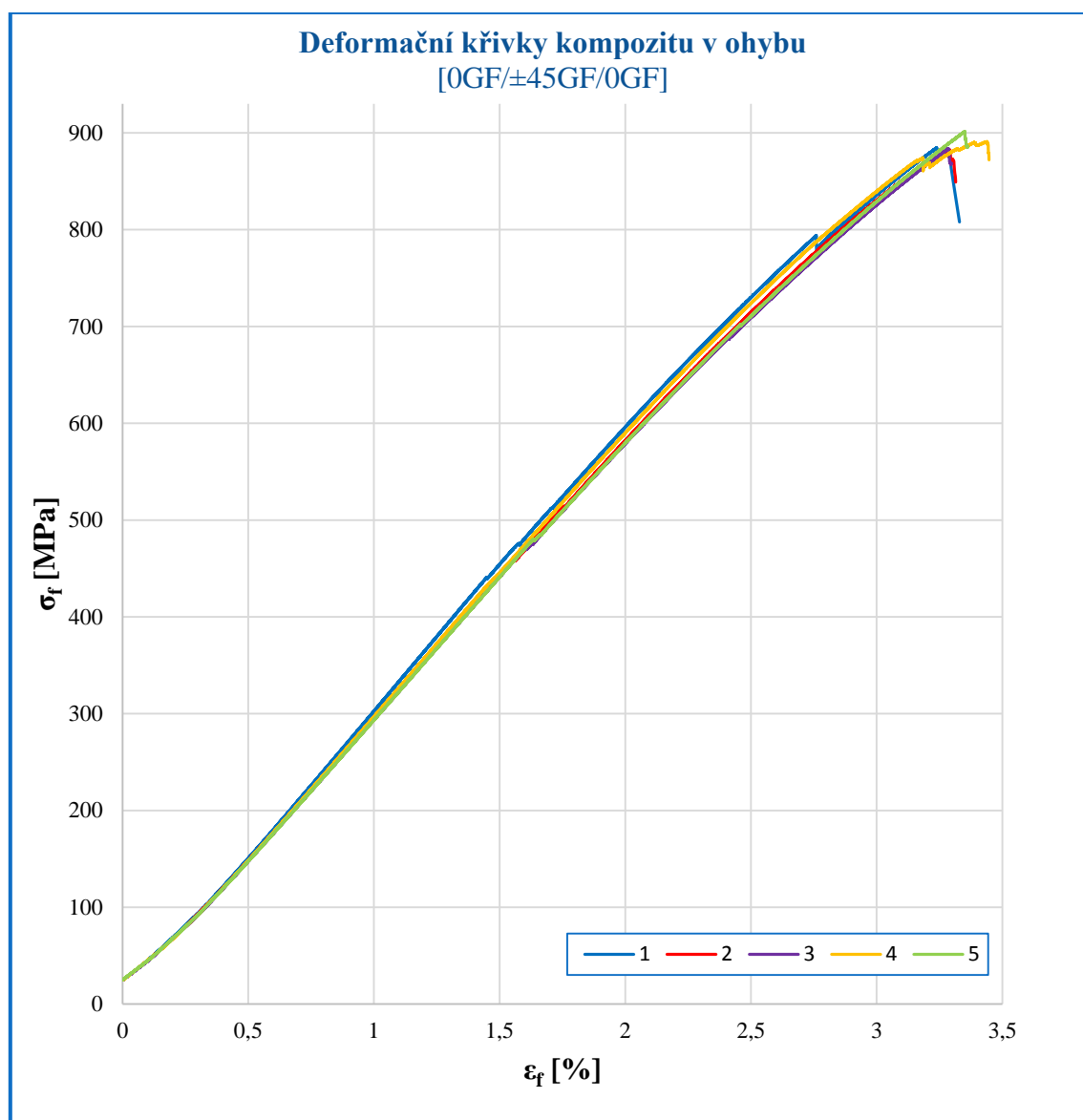
Příloha č. 11: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/90GF/90GF/0GF]

B	[0GF/90GF/90GF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	860	27850
2	893	27700
3	884	27700
4	902	27835
5	852	28000
\bar{x}	878	27817
s	22	125



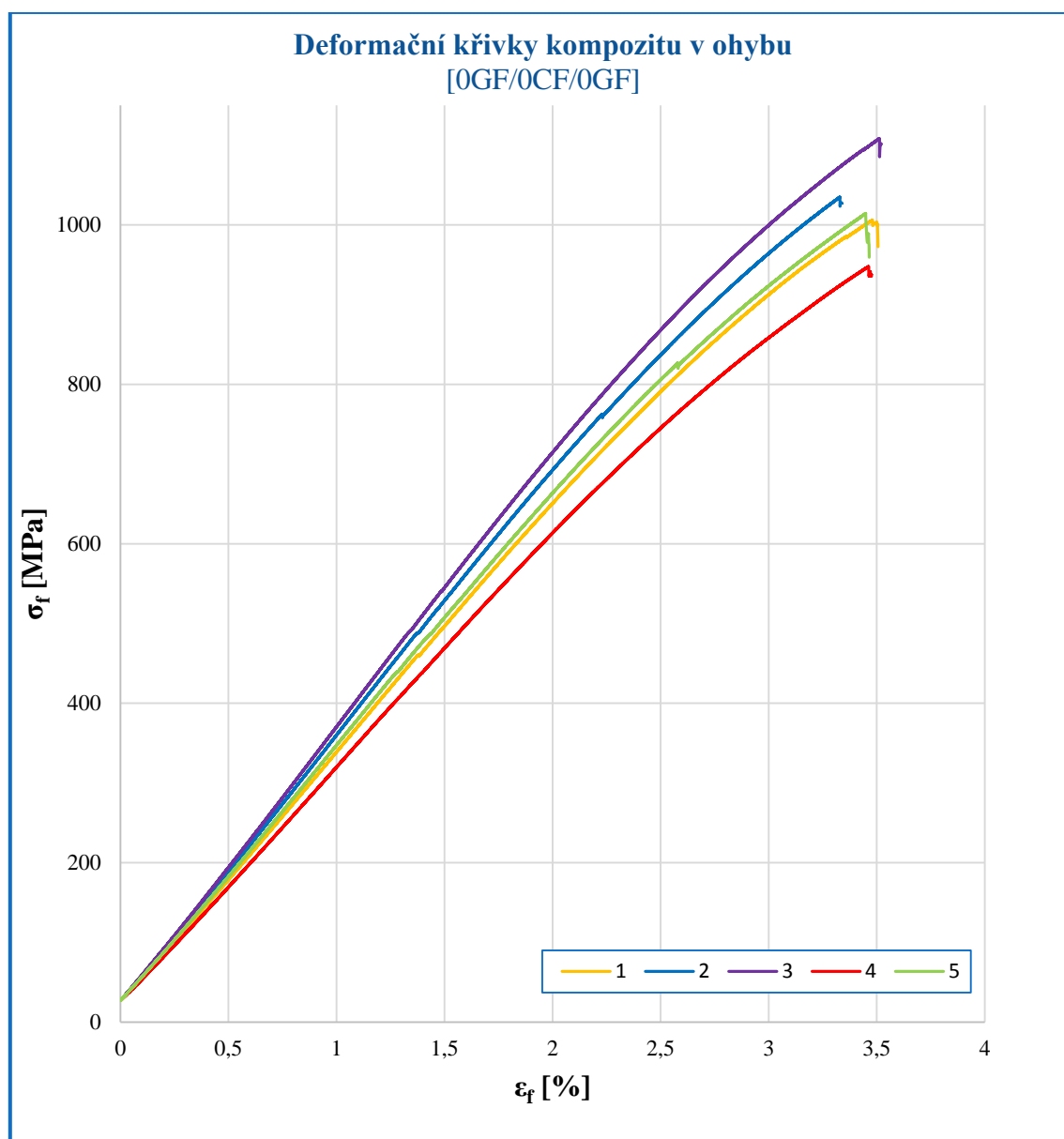
Příloha č. 12: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/±45GF/0GF]

C	[0GF/±45GF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	885	21954
2	883	21480
3	884	22637
4	891	21954
5	905	22292
\bar{x}	890	22063
s	10	432



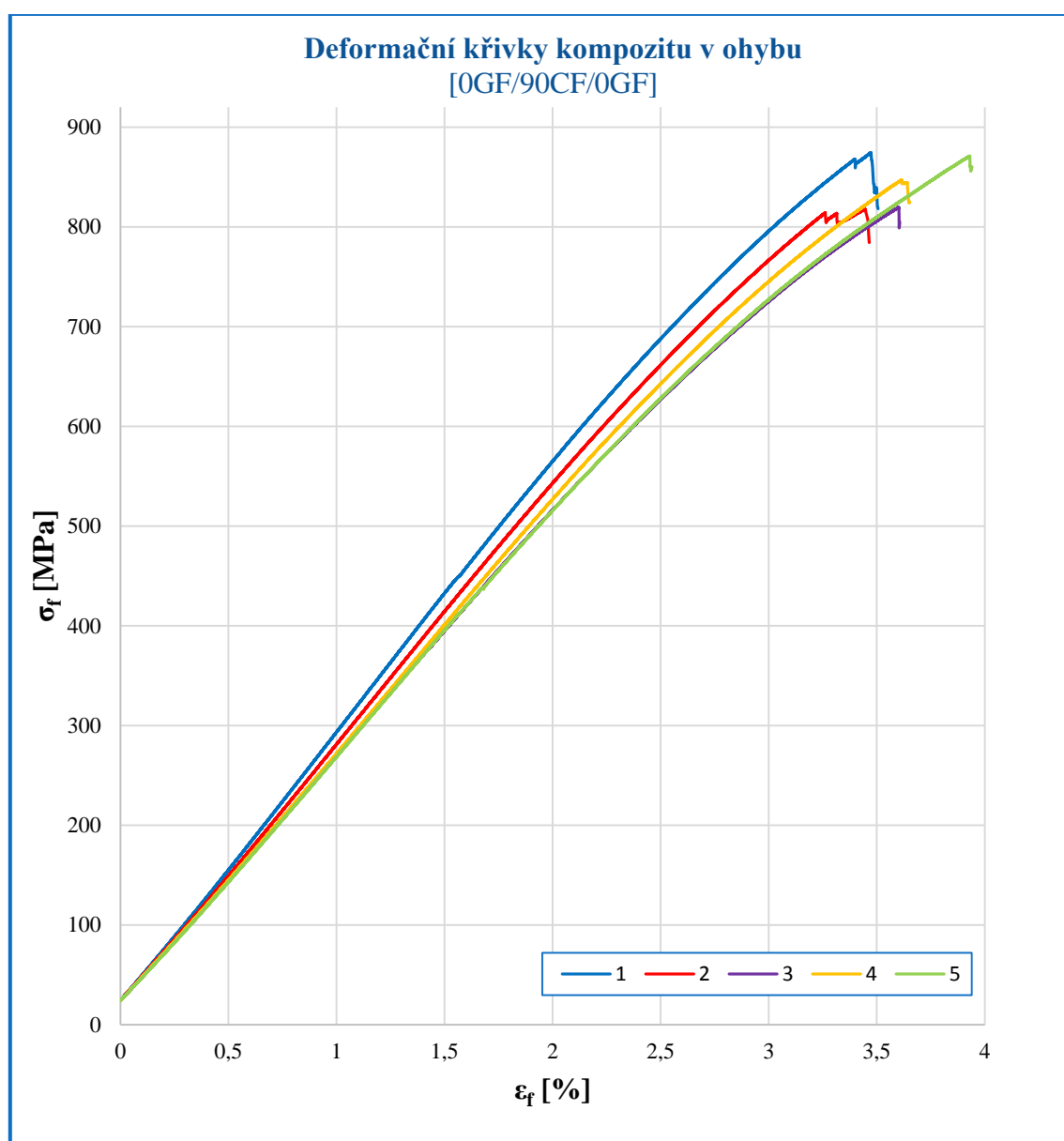
Příloha č. 13: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/0CF/0GF]

D	[0GF/0CF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	917	27517
2	944	25463
3	1036	27101
4	864	28092
5	925	26116
\bar{x}	937	26858
s	63	1063



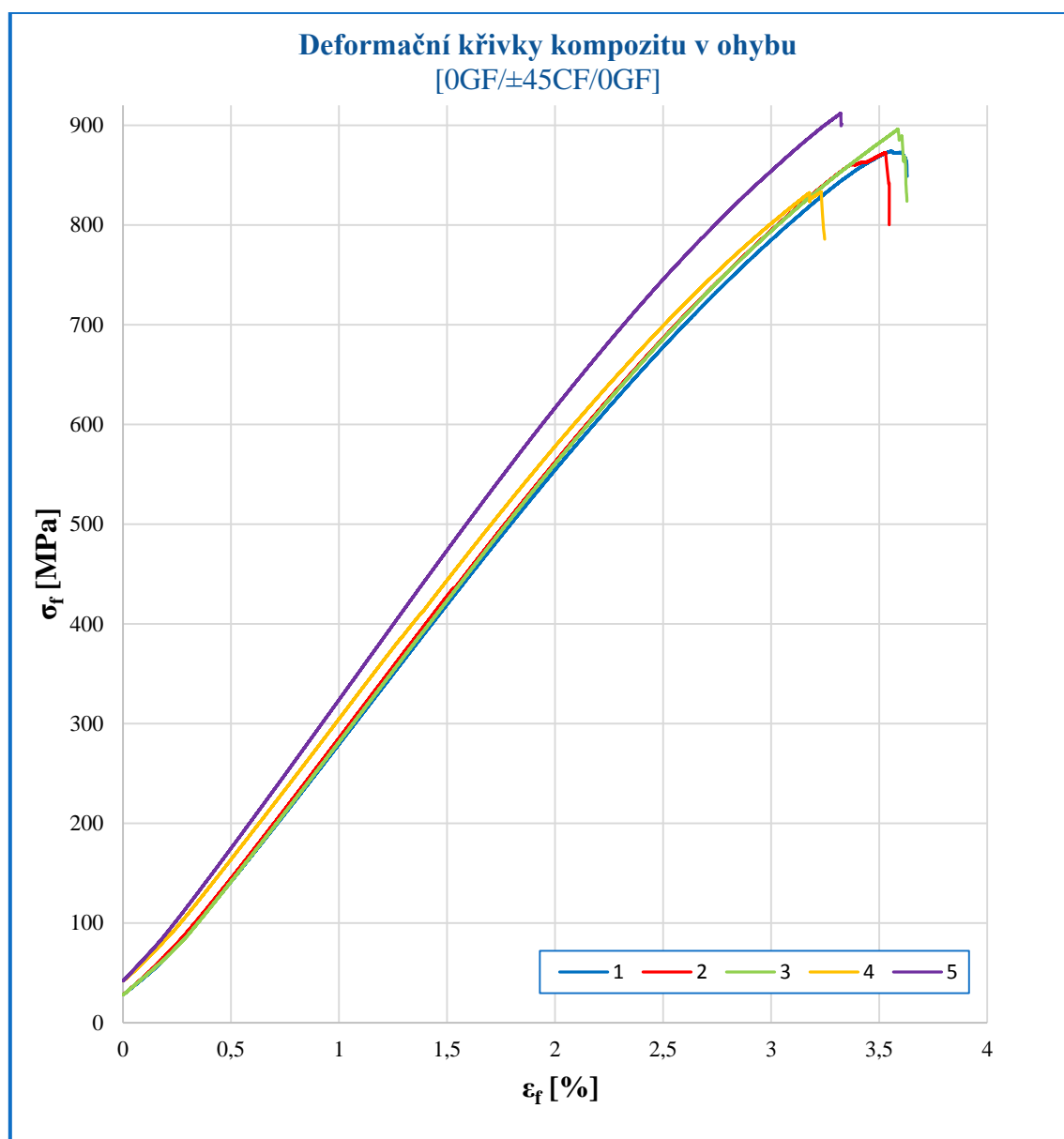
Příloha č. 14: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/90CF/0GF]

E	[0GF/90CF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	871	25242
2	818	23922
3	820	22614
4	847	23386
5	875	22747
\bar{x}	846	23582
s	27	1066



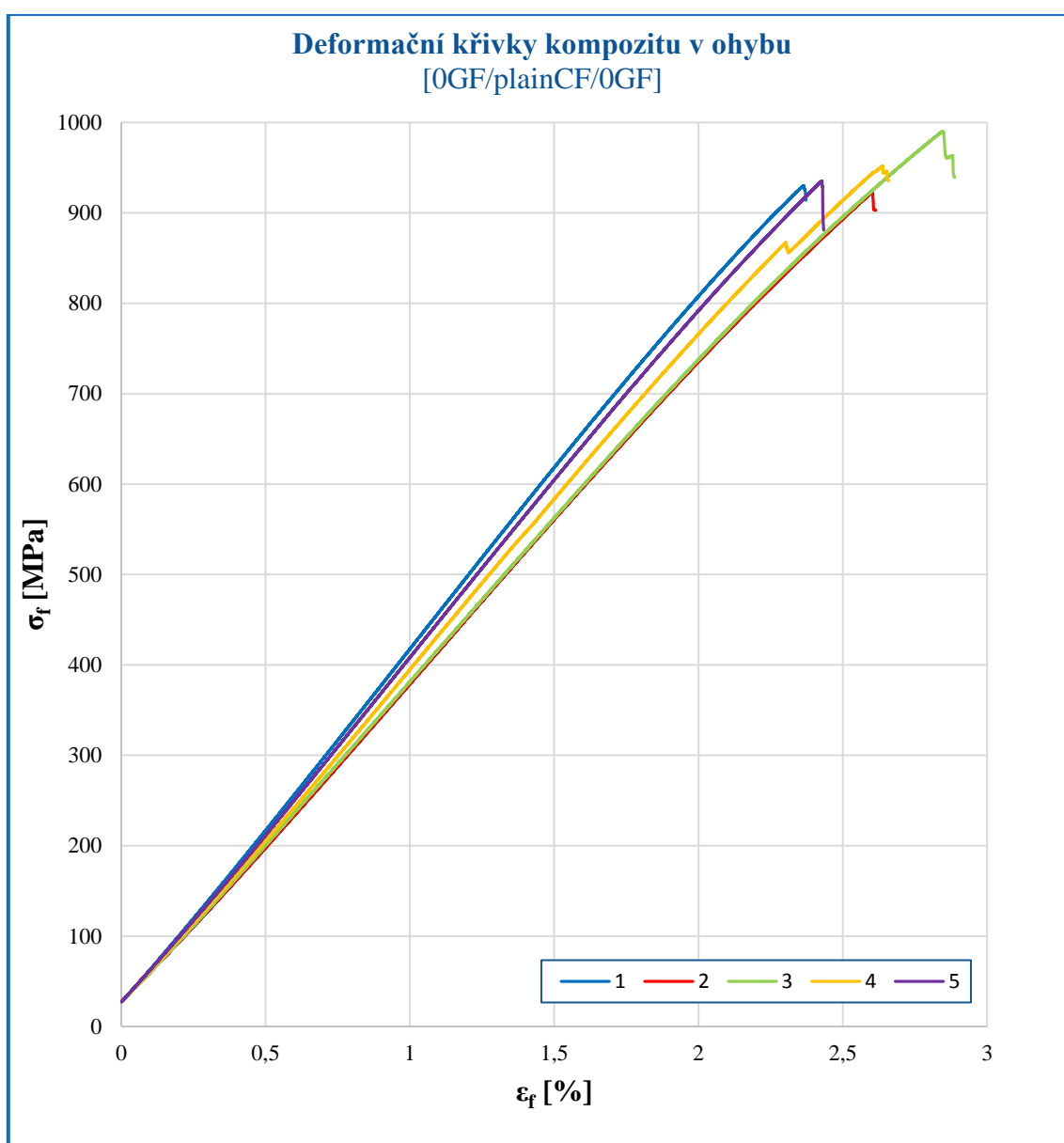
Příloha č. 15: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/±45CF/0GF]

F	[0GF/±45CF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	874	19502
2	873	20576
3	896	18933
4	833	21803
5	912	23959
\bar{x}	878	20955
s	30	2005



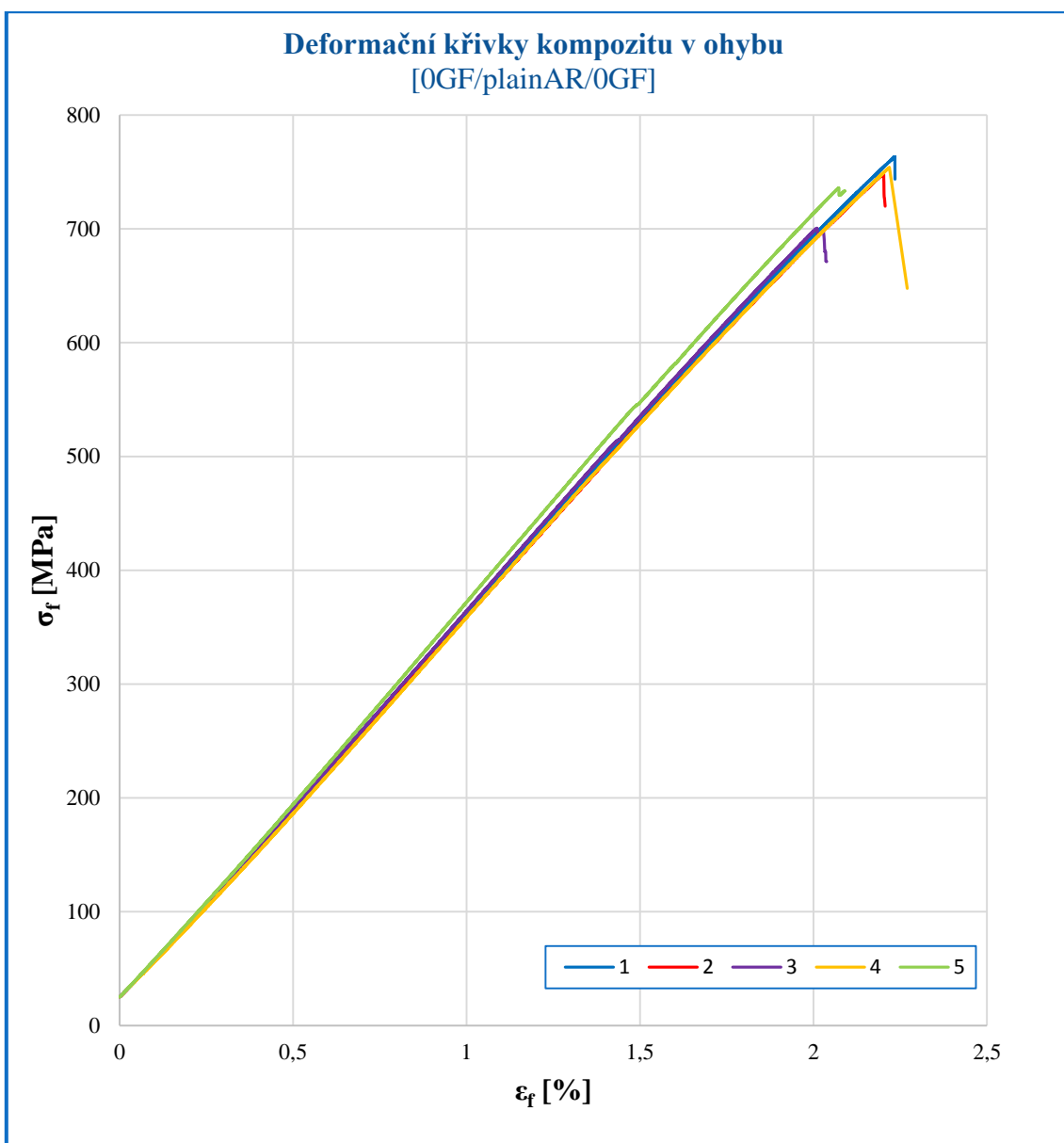
Příloha č. 16: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/plainCF/0GF]

G	[0GF/plainCF/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	930	36166
2	923	33481
3	990	36058
4	952	34115
5	935	35120
\bar{x}	946	34988
s	27	1181



Příloha č. 17: Naměřené ohybové vlastnosti – kompozit [0GF/plainAR/0GF]

H	[0GF/plainAR/0GF]	
zkouška	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]
1	763	31251
2	749	30311
3	701	31177
4	754	31799
5	748	30591
\bar{x}	743	31026
s	24	586



Příloha č. 18: Naměřené rázové vlastnosti (metoda Charpy)

0	Polyuretan									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	59,8	56,6	33,9	45,7	52,8	56,6	49,5	47,1	50,3	8,3

A	[0GF/0GF/0GF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	264,5	281,4	268,6	260,4	285,5	295,3	305,6	278,5	280,0	15,5

B	[0GF/90GF/90GF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	136,6	172,6	134,1	189,7	175,2	170,0	184,2	166,2	166,1	20,5

C	[0GF/±45GF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	330,2	295,1	324,4	327,3	315,6	314,3	257,0	326,1	311,3	24,7

D	[0GF/0CF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	S
a_{cU} [kJ/m ²]	147,5	159,3	138,3	155,4	126,9	173,7	179,0	140,9	152,6	17,9

E	[0GF/90CF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	292,2	283,6	275,1	304,2	297,0	329,6	277,6	311,5	296,4	17,3

F	[0GF/±45CF/0G]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	263,4	280,3	265,3	272,6	265,3	266,6	263,4	262,1	267,4	5,8

G	[0GF/plainCF/0GF]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	146,9	137,8	168,1	160,4	161,8	153,6	152,3	148,2	153,6	9,7

H	[plainAR/0GF/plainAR]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	159,5	168,1	165,6	178,0	161,9	170,6	165,6	180,8	168,8	7,5

I	[plainAR/0GF/0GF/plainAR]									
zkouška	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	s
a_{cU} [kJ/m ²]	225,3	238,6	223,6	242,2	257,1	251,9	227,7	253,1	239,9	13,4